



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HEISKANEN ROOSA
MAANVASTAISTEN SEINIEN SISÄPUOLINEN LISÄLÄM-
MÖNERISTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 9. joulu-
kuuta 2015

TIIVISTELMÄ

HEISKANEN, ROOSA: Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 82 sivua, 14 liitesivua

Kesäkuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: kosteus, lämmöneristys, seinä, kellari

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia maanvastaisten seinien sisäpuolisten lisälämmöneristysratkaisujen kosteusteknistä toimintaa. Tutkittaviksi rakenteiksi valittiin kolme eri vuosikymmenille tyypillistä rakennetta, jotka eroavat toisistaan lämmön- ja vedeneristeiden sijoittelun suhteen.

Alkuperäisten rakenteiden ja kunkin korjausratkaisun lämpötila- ja kosteusolosuhteet selvitettiin simuloimalla rakenteet Delphin 5.8.3 -ohjelmalla FRAME-hankkeessa (Vinha et al. 2013) määritettyjen rakennusfysikaalisten testivuosiolosuhteissa. Rakenteiden toimintaa tarkasteltiin kuivumisen ja homeenkasvun näkökulmista. Homeenkasvun arvioimiseen käytettiin suomalaista homemallia, jonka tuloksena saadaan rakennekohdaiset homeindeksit valituissa tarkastelupisteissä. Homeindeksit laskettiin Delphin-simulaatioista saatujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tulosten perusteella. Homeenkasvun raja-arvoksi asetettiin $M_{\max} \leq 1,0$.

Sisäpuolisia korjausratkaisuja verrattiin nykysuositusten mukaiseen ulkopuoliseen korjaustapaan. Ulkopuolisessa korjauksessa seinän vierusmaa kaivetaan auki ja kantavan rakenteen ulkopintaan asennetaan vedeneristys ja ulommaiseksi kosteudenkestävä lämmöneriste. Kaivanto täytetään lopuksi kapillaarikatkosoralla, mikä estää maakosteuden pääsyn rakenteeseen. Myös seinän maanpinnan yläpuolinen osa eristetään vastaavalla lämmöneristeellä, joten eristysratkaisu ei sovi kohteisiin, joissa rakennuksen julkisivuun ei sallita muutoksia.

Sisäpuolisista eristysvaihtoehdoista tutkittiin solumuovi-, kalsiumsilikaatti- ja kevytbetonieristeitä. Jo maasta diffuusiolla seinään siirtyvä kosteus riitti suurimmassa osassa tapauksista muodostamaan kriittiset olosuhteet seinän alaosaan. Tutkituista materiaaleista kalsiumsilikaattilevy todettiin turvallisimmaksi sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi kaikissa betonirakenteisissa maanvastaisissa seinissä. Kalsiumsilikaatin voimakas kapillaarisuus ja hyvä vesihöyrynläpäisevyys mahdollistavat seinän kuivumisen sisäänpäin, joten rakenne pysyy kuivana. Voimakkaasti alkalisenä materiaalina kalsiumsilikaatti myös estää tehokkaasti homeenkasvua. Ulkopuolelta lämmön- ja vedeneristettyihin rakenteisiin voidaan sallia myös muiden eristysmateriaalien käyttö sisäpuolisena lisäeristeenä. Eristyspaksuudelle asetetaan kuitenkin rajoitukset solumuovieristeitä tai kevytbetonia käytettäessä. Tuloksena esitetään maanvastaisen seinän sisäpuolisen eristysmateriaalin valintaan kehitetty prosessikaavio.

ABSTRACT

HEISKANEN, ROOSA: Interior insulation of basement walls

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 82 pages, 14 Appendix pages

June 2016

Master's Degree Program in Civil Engineering Technology

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: moisture, insulation, basement, wall

The objective of this study was to investigate the hygrothermal effects of interior insulation on basement walls in Finnish climatic conditions. Three concrete wall structures with differing hygrothermal behaviour were selected for the study. The main difference between the structures is the placement of thermal and water insulation.

The moisture and heat conditions of the original structures and improved structures were simulated with Delphin 5.8.3 with the building physical test years produced in the FRAME-project (Vinha et al. 2013). The functionality of each improvement method was examined from the perspective of drying and mould growth. The Finnish mould growth model was used for determining the possibility for mould growth in each structure. Mould indexes were calculated with temperature and relative humidity data from the Delphin simulations. The mould index limit for a functioning structure was set at $M_{\max} \leq 1.0$.

Interior insulation methods were compared with a typical approved exterior insulation method. In the exterior method a layer of soil next to the wall is removed, water insulation is applied to the exterior side of the wall and a moisture resistant thermal insulation on the very outside. The excavation is then filled with coarse gravel to prevent groundwater from wetting the structure. A continuous thermal insulation must also be applied to the above ground part of the wall, so this method is not applicable for buildings to which alterations to the façade are prohibited.

Materials selected for the study include expanded and extruded polystyrene, cellular concrete and calcium silicate board. In most cases moisture diffusion from the ground caused critical conditions at the base of the wall. From the selected materials, calcium silicate was found the safest solution for interior insulation. As a highly permeable and capillary active material calcium silicate allows the structure to dry from the inside. Calcium silicates highly alkaline consistency also helps prevent mould growth. For structures with existing exterior water and thermal insulation, other insulation materials are also applicable. However, in case of less permeable materials insulation thickness must be limited. In the conclusion, a process flow chart is presented to help select the right insulation material for a specific structure.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle osana COMBI-hanketta, jonka tavoitteena on kehittää ratkaisuja palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi lähes nollaenergiatasolle. Tutkimus liittyy tarkemmin työpakettiin T 3.2, jossa tarkasteltavana on korjausratkaisujen rakennusfysikaalinen toiminta.

Kiitän Juha Vinhaa mielenkiintoisen tutkimusaiheen tarjoamisesta. Kiitos Anssi Laukariselle avusta ja opastuksesta diplomityön teossa ja laskentaohjelmien käytössä. Kiitokset myös muille rakennusfysiikan tutkimusryhmäläisille vertaistuesta ja mukavasta työilmapiiristä, sekä kaikille rakennustalon M-siiven työntekijöille virkistävistä kahvipöytäkeskusteluista.

Erityiskiitos kuuluu miehelleni Jukka Heiskaselle ja kaikille opiskeluaikana saamilleni uusille ystäville, joiden seurassa kuusi vuotta TTY:ssä on mennyt yhdessä hujauksessa.

Tampereella, 31.5.2016

Roosa Heiskanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT	3
2.1	Rakenteiden kosteustekninen toiminta	3
2.1.1	Hygroskooppinen tasapainokosteus.....	4
2.1.2	Vesihöyryn diffuusio	5
2.1.3	Kosteuden kapillaarinen siirtyminen.....	7
2.1.4	Ylikyllästetty materiaali	8
2.2	Rakenteiden lämpötekkninen toiminta	9
2.2.1	Lämmön johtuminen	9
2.2.2	Lämmön konvektio	10
2.2.3	Lämpösäteily.....	11
3.	MAANVASTAISET SEINÄT	13
3.1	Toimiva rakenne	13
3.2	Lämpö- ja kosteusolosuhteet.....	15
3.3	Ongelmat ja niiden syyt	16
3.4	Nykyiset korjausratkaisut ja lisäeristäminen.....	17
3.4.1	Vedeneristyksen korjaus.....	18
3.4.2	Lämmöneristyksen korjaus.....	19
3.4.3	Energiamääräykset korjausrakentamisessa	20
4.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT	21
4.1	Materiaaliominaisuudet.....	21
4.2	Mitoittavat sisä- ja ulkoilman olosuhteet.....	22
4.3	Laskennan alkuolosuhteet	24
4.4	Homeindeksi.....	25
5.	SIMULAATIOT	29
5.1	Tutkittavat rakenteet	29
5.2	Laskentaohjelmat.....	33
5.3	Laskenta-ajan optimointi.....	34
5.3.1	Laskentaverkko	34
5.3.2	Laskenta-ajan valinta	35
5.3.3	Maakosteus mallissa.....	35
5.3.4	Vedeneristeen mallintaminen	37
6.	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	41
6.1	Maanvastainen seinä 1959	41
6.1.1	Homeindeksit	43
6.1.2	Lähtötilanne	44
6.1.3	Korjausvaihtoehto 1: eristämätön rakenne	47
6.1.4	Korjausvaihtoehto 2: ulkopuolinen solumuovieristys.....	47
6.1.5	Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen solumuovieristys.....	48

6.1.6	Korjausvaihtoehto 4: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys.....	49
6.1.7	Korjausvaihtoehto 5: sisäpuolinen kevytbetonieristys.....	52
6.2	Maanvastainen seinä 1963	52
6.2.1	Homeindeksit	54
6.2.2	Lähtötilanne	55
6.2.3	Korjausvaihtoehto 1: eristämätön rakenne	57
6.2.4	Korjausvaihtoehto 2: ulkopuolinen solumuovieristys.....	57
6.2.5	Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen solumuovieristys.....	60
6.2.6	Korjausvaihtoehto 4: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys.....	63
6.2.7	Korjausvaihtoehto 5: sisäpuolinen kevytbetonieristys.....	63
6.3	Maanvastainen seinä 1990	63
6.3.1	Homeindeksit	65
6.3.2	Lähtötilanne	66
6.3.3	Korjausvaihtoehto 1: sisäpuolinen solumuovieristys.....	68
6.3.4	Korjausvaihtoehto 2: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys.....	71
6.3.5	Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen kevytbetonieristys.....	73
6.4	Korjausratkaisujen toimivuus tulevaisuuden ilmastossa	74
6.5	Virhearviointi	74
7.	YHTEENVETO.....	76
	LÄHTEET	80

LIITE A: SIMULAATIOISSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET

LIITE B: KÄYTETTYJEN ILMASTO-OLOSUHTEIDEN KUVAAJAT

LIITE C: LÄMMÖNJOHTAVUUDET U-ARVOJEN LASKENNASSA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	absorptiokerroin	-
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m^2/s
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
ε	emissiviteetti	-
λ	lämmönjohtavuus	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	-
ν	vesihöyrypitoisuus	kg/m^3
ρ	heijastuskerroin	-
ρ	tiheys	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmannin säteilyvakio	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	läpäisykerroin	-
d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
h	lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_w	permeabiliteetti vedelle	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
m	massa	kg
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
s	huokosalipaine	Pa
s_d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	s, h, d, a
u	kosteuspitoisuus	kg/kg
w	kosteuspitoisuus	kg/m^3
A_w	kapillariteettikerroin	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$
B	veden tunkeutumiskerroin	$\text{m}/\text{s}^{1/2}$
M	homeindeksi	-
R	lämmönvastus	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
T	lämpötila	°C, K
U	lämmönläpäisykerroin	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
V	tilavuus	m^3
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m

CaSi	kalsiumsilikaatti (calcium silicate)
COMBI	Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings
EPS	paisutettu polystyreeni (expanded polystyrene)
FRAME	Future envelope assemblies and HVAC solutions
HHL	homehtumisherkkyyssluokka
HTL	homekasvun taantumaluokka
RH	suhteellinen kosteus (relative humidity)
TCSC	Tampere Center of Scientific Computing
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
XPS	suulakepuristettu polystyreeni (extruded polystyrene)

1. JOHDANTO

Tiukentuvat energiatehokkuusvaatimukset asettavat uusia rajoitteita rakennusvaipan lämpöhäviöille. Korjausrakentamisessa tulisi pyrkiä vähintään rakennusosakohtaisten U-arvojen puolittamiseen. Lähes nollaenergiatasoon pyrittäessä on lämmöneristystä lisättävä myös maanvastaisiin rakenteisiin.

Sytä maanvastaisten seinien lisälämmöneristämiseen on monia. Rakennusten kellari-kerrokset on usein rakennettu kylmiksi säilytystiloiksi, eikä niiden eristykseen ole kiinnitetty erityistä huomiota. Tilantarpeen takia kylmiä kellaritiloja remontoidaan lämpimiksi oleskelutiloiksi, jolloin lämmöneristystä on lisättävä, jotta saadaan luotua miellyttävät sisäilmaolosuhteet. Maanvastaisten seinien korjaustarve voi lähteä myös havaitusta kosteusvauriosta, tai halusta parantaa koko rakennuksen energiatehokkuutta.

Lämmöneristeen lisääminen maanvastaisten seinien ulkopuolelle ei aina ole mahdollista, mikä luo kysyntää sisäpuolisille eristysratkaisuille. Keski-Euroopassa on kehitetty seinien sisäpuoliseen eristämiseen soveltuvia kalsiumsilikaattieristeitä ja niistä on saatu hyviä kokemuksia muun muassa Saksassa ja Virossa (Häupl et al. 2004 & Klöške et al. 2015). Suomen kylmässä ilmastossa kalsiumsilikaattieristeistä on vielä varsin vähän kokemusta, joten käyttökelpoisuuden varmistamiseksi tarvitaan uusia tutkimuksia.

Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa (Goldberg & Steigauf 2013) omakotitalon kellarin maanvastaisten seinien lisälämmöneristyksellä saatiin aikaan jopa 10,3 % vuosittaiset säästöt energiankulutuksessa. Tutkimuksessa huomattiin myös, että sisäpuolisella lämmöneristyksellä oli enemmän vaikutusta energiankulutukseen ulkopuoliseen erityyseen verrattuna. (Goldberg & Steigauf 2013) Erot selittyvät mahdollisesti sillä, että sisäpuolisella eristyksellä vältetään kylmäsillalta, joka muodostuu seinän maanpinnan yläpuoliseen osaan, jos eristettä ei uloteta sokkelin päälle. Sisäpuolinen eristys ei kuitenkaan eliminoi kylmäsillan mahdollisuutta välipohjan liittymässä.

Tässä tutkimuksessa selvitetään kirjallisuuden perusteella Suomen rakennuskannan tyyppillisiä maanvastaisia seinärakenteita ja erityisesti kosteusteknisesti riskialttiita rakenteita. Laskennallisiin tarkasteluihin valitaan kolme kosteustekniseltä toiminnaltaan eriävää rakennetta. Tietokonesimulaatioiden avulla vertaillaan eri korjausvaihtoehtojen vaikutuksia valittujen rakenteiden kosteustekniseen toimintaan.

Kosteusteknisesti haastavimpia kohtia maanvastaisissa seinissä ovat liittymät viereisiin rakenteisiin: kellarin lattiaan ja ulkoseinään. Aiemmissa maanvastaisiin seiniin liittyvissä tutkimuksissa (Kuljunen 2014 & Ramsay 2013) on tutkittu erikseen seinän maan-

päällistä osaa ja maanvastaista osaa, mutta liittymäkohtien tarkastelu on jätetty huomi-
oimatta. Tässä tutkimuksessa seinärakenne mallinnetaan kokonaisuudessa lattiasta
maanpinnan yläpuolelle ulottuen, jolloin liittymäkohtien vaikutukset saadaan myös
huomioitua.

2. RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT

Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa on tärkeää ymmärtää rakenteen toiminnan kannalta keskeiset rakennusfysikaaliset ilmiöt. Tässä tutkimuksessa keskitytään lämmön ja kosteuden vaikutuksiin maanvastaisissa seinärakenteissa. Lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteissa tapahtuu ympäröivän ilman lämpötilan, ilmanpaineen ja kosteuspitoisuuden muutosten vaikutuksesta (Hagentoft 2001).

Lämmön ja kosteuden siirtyminen ovat suorassa yhteydessä toisiinsa. Rakenteen läpi kulkeutuva ilma kuljettaa mukanaan lämpöä ja kosteutta, materiaalin kosteuspitoisuus vaikuttaa suoraan sen lämmönjohtavuuteen ja kosteuden haihtuminen materiaalin pinnasta jäädyttää rakennetta. Ilman mukana huoneilmaan voi kulkeutua myös haitta-aineita kuten radonia, mutta tässä tutkimuksessa tarkastelut rajataan pelkästään rakenteen kosteustekniseen toimintaan. (Hagentoft 2001)

2.1 Rakenteiden kosteustekninen toiminta

Kosteutta esiintyy rakennusmateriaaleissa kolmessa eri muodossa: höyrynä, vetenä ja jäänä. Kosteuden siirtyminen tapahtuu joko nestemäisessä muodossa vetenä tai kaasun muodossa vesihöyrynä. Kosteutta siirtyy diffuusion, konvektion, kapillaarisen imun, tuulen paineen tai painovoiman vaikutuksesta. (Hagentoft 2001)

Materiaalissa oleva kosteuden määrä voidaan ilmoittaa kosteuspitoisuutena paino-osina [kg/kg]

$$u = \frac{m_w}{m_0}, \quad (2.1)$$

jossa

m_w on materiaalin sisältämän veden massa [kg] ja
 m_0 on materiaalin kuivapaino,

tai kosteuspitoisuutena tilavuutta kohti [kg/m³]

$$w = \frac{m_w}{V_0}, \quad (2.2)$$

jossa

V_0 on materiaalin tilavuus kuivana [m³]. (Vinha et al. 2005)

Materiaalin hygroskooppisuus vaikuttaa merkittävästi sen kosteudensietokykyyn. Materiaalit kuten solumuovi ja mineraalivilla pystyvät sitomaan vain pieniä määriä kosteutta hygroskooppisesti, jolloin suuri kosteuslisä aiheuttaa nopeasti kondenssia eristeen pinnalle. Kevytbetoni ja puukuitueristeet pystyvät sitomaan huomattavasti enemmän kosteutta aiheuttamatta haittaa rakenteen toimivuudelle. (YM 2014)

2.1.2 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikkeestä johtuva ilmiö, jossa aineen pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. (Hagentoft 2001) Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa tarkastellaan lähinnä vesihöyryn diffuusiota.

Diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] yksidimensioisessa tapauksessa saadaan laskettua Fick'n ensimmäisen lain mukaan kaavalla (2.3) (Hagentoft 2001).

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx}, \quad (2.3)$$

jossa

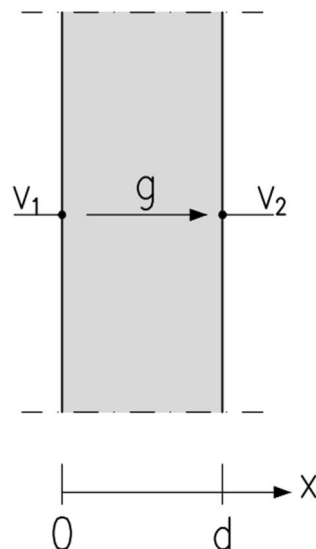
g	on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$],
d_n	on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m^2/s],
n	on vesihöyrypitoisuus tilavuutta kohti [kg/m^3] ja
x	on pituus kosteusvirran suunnassa [m].

Kuva 2.2 kuvaa stationääritilannetta, jolloin kaava yksinkertaistuu muotoon (Hagentoft 2001):

$$g = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d}, \quad (2.4)$$

jossa

g	on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$],
d_n	on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m^2/s],
n_1 ja n_2	ovat kosteuspitoisuudet materiaalin eri puolilla [kg/m^3] ja
d	on materiaalikerroksen paksuus [m].



Kuva 2.2 Vesihöyryn diffuusio materiaalikerroksen läpi.

Materiaalin diffusiovastus voidaan ilmaista myös vesihöyrynosapaine-eron avulla, jolloin kosteusvirran tiheys kaava saa muodon (Hens 2007):

$$g = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} \quad (2.5)$$

jossa

g	on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$],
δ_p	on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$],
p_n	on vesihöyryn osapaine huokosissa [Pa] ja
x	on pituus kosteusvirran suunnassa.

Diffusiovastuskerroin m kuvaa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta ilman vesihöyrynläpäisevyyteen. Se saadaan laskettua kaavasta (2.6) (Hagentoft 2001 & Hens 2007).

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \quad \text{tai} \quad \mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}, \quad (2.6)$$

jossa

m	on diffusiovastuskerroin ja
D_a ja δ_a	kuvaavat ilman vesihöyrynläpäisevyyttä.

$$D_a = (22,2 + 0,14 \cdot \theta) \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2.7)$$

$$\delta_a = \frac{2,0 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,81}}{P_n}, \quad P_n = 101325 \text{ Pa} \quad [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]. \quad (2.8)$$

Diffusiovastuskertoimen avulla kosteusvirran tiheyden kaava saadaan muotoon (Hagentoft 2001):

$$g = -\frac{D}{\mu} \frac{dv}{dx}. \quad (2.9)$$

Materiaalin kykyä vastustaa vesihöyryn virtausta lävitseen kutsutaan vesihöyrynvastukseksi (Z_n). Kosteusvirran tiheys voidaan ilmaista myös vesihöyrynvastuksen avulla seuraavasti (Hagentoft 2001):

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v}, \quad (2.10)$$

jossa

Z_n on vesihöyrynvastus ($=d/d_n$) [s/m].

Vakio-olosuhteissa kosteusvirran tiheys kerroksellisen rakenteen läpi saadaan laskettua rakenteen eri puolilla olevan kosteuspitoisuuseron sekä materiaalikerrosten yhteenlasketun vesihöyrynvastuksen avulla (ks. kaava 2.11). (Hagentoft 2001)

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_{v,tot}}, \quad Z_{v,tot} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\delta_{v,i}} + Z_{vi} + Z_{ve} \quad (2.11)$$

Kerroksellisen rakenteen kosteusvirran tiheyden laskenta on analoginen lämpövirran tiheyden laskennan kanssa. (Hagentoft 2001)

Diffuusiovastuskertoimen avulla saadaan myös laskettua materiaalin suhteellinen diffuusiovastus s_d [m] kaavalla (2.12) (Vinha 2011).

$$s_d = \mu \cdot d, \quad (2.12)$$

jossa

d on materiaalikerroksen paksuus [m].

Simulointiohjelmissa esimerkiksi vedeneristekerroksen vesihöyrynvastus ilmoitetaan usein suhteellisen diffuusiovastuksen avulla.

2.1.3 Kosteuden kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarinen materiaali imee itseensä kosteutta ollessaan kosketuksessa vapaaseen veteen. Vesi imeytyy huokosalipaineen vaikutuksesta kunnes materiaali saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden. Tätä tilaa sanotaan kapillaariseksi kosteustasapainoksi, jossa huokosalipaine ja painovoima ovat tasapainossa. (YM 2014 & Künzeli 1995)

Veden kapillaarinen siirtyminen vaatii yhtenäisen kapillaarihuokosverkoston. Esimerkiksi betonissa kapillaarihuokokset ovat halkaisijaltaan 0,1...10 μm (Suomen Betoniyhdistys 2012). Materiaalin kapillaarisuuteen vaikuttaa sen huokosjakauma. Pienemmissä

huokosissa kapillaarinen imu eli huokosalipaine on hyvin voimakas, mutta virtaus on kitkan vaikutuksesta hidasta. Suuremmissa huokosissa kapillaarinen imu on heikompaa, mutta virtaus nopeaa. Kosteus siirtyy kapillaarisesti aina suuremman huokosalipaineen suuntaan. (Leivo & Rantala 2002)

Kun materiaalin alapinta asetetaan kontaktiin veden kanssa, voidaan kapillaarisen kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] laskea yhtälöstä (Hagentoft 2001):

$$g = \frac{A_w}{2\sqrt{t}}, \quad (2.13)$$

jossa

g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$],
 A_w on kapillariteettikerroin [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$] ja
 t on aika [s]

Kapillaarisesti vedellä kyllästetyn materiaalin rajapinnan sijainti x_p [m] tietyllä ajanhetkellä saadaan yhtälöstä (Hagentoft 2001):

$$x_p = B \cdot \sqrt{t}, \quad (2.14)$$

jossa

B on veden tunkeutumiskerroin [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$] ja
 t on aika [s].

Kun x_p asetetaan materiaalin paksuuden d mukaiseen arvoon, saadaan materiaalikerroksen läpi kulkevan kosteusvirran tiheydelle kaava (2.15). (Hagentoft 2001)

$$g = \frac{A_w \cdot B}{2 \cdot d}. \quad (2.15)$$

Kaavoissa (2.13), (2.14) ja (2.15) on otettu huomioon painovoiman vaikutus kapillaariseen kosteuden siirtymiseen. Näitä kaavoja voidaan siis käyttää vain, jos kapillaarinen veden siirtyminen tapahtuu alhaalta ylöspäin. Yleisessä tapauksessa, esimerkiksi jos kapillaarinen virtaus tapahtuu vaakasuunnassa, kosteusvirran tiheys g_{cap} saadaan lasketua Darcyn lain avulla kaavalla (2.16). (Vinha 2011)

$$g_{cap} = -k_w \frac{ds}{dx}, \quad (2.16)$$

jossa

k_w on materiaalin kosteuden johtavuus [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] ja
 s on huokosalipaine [Pa].

2.1.4 Ylikyllästetty materiaali

Materiaalin kosteuspitoisuuden ylittäessä kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden se siirtyy ylikyllästetylle alueelle, jolloin suhteellinen kosteus huokostilassa on aina 100

%. Tässä vaiheessa materiaalin kapillaarihuokokset ovat täysin täyttyneitä, mutta materiaalissa on edelleen täyttymättömiä huokosia, jotka ovat liian suuria kapillaariselle veden nousulle. Nämä huokokset voivat kuitenkin täyttyä diffuusion vaikutuksesta. Tilaa, jossa materiaalin kaikki huokokset ovat veden täyttämiä, sanotaan maksimikosteuspitoisuudeksi. (Künzel 1995) Materiaalin maksimikosteuspitoisuus saadaan määritettyä vakuumin avulla.

2.2 Rakenteiden lämpötekniinen toiminta

Lämpöenergia siirtyy kolmella eri tavalla johtumalla, säteilyä sekä konvektiolla. Käytännön sovelluksissa on otettava huomioon kaikki kolme lämmön siirtymismuotoa.

2.2.1 Lämmön johtuminen

Johtumisessa lämpöenergia välittyy aineen molekyyliden sisäisen värähtelyn vaikutuksesta. Johtumista tapahtuu kiinteässä aineessa, kaasussa ja nesteessä.

Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys q [W/m^2] isotrooppisessa ja homogeenisessa ainekerroksessa kuvataan Fourierin lain avulla kaavalla (2.17) (Hagentoft 2001).

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \nabla T = -\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (2.17)$$

jossa

\mathbf{q}	on lämpövirrantiheys [W/m^2]
λ	on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
T	on lämpötila [K] ja
x, y ja z	ovat lämpövirran suuntakoordinaatit [m].

Yksidimensioisessa tapauksessa lämpötilajakauman ollessa lineaarinen materiaalikerroksen läpi, kaava yksinkertaistuu muotoon (Björkholtz 1997):

$$q = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (2.18)$$

jossa

λ	on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
d	on materiaalikerroksen paksuus [m]
T_1 ja T_2	ovat lämpötilat materiaalin eripuolilla [K]

Materiaalin lämmönvastus R kuvaa materiaalin paksuuden ja lämmönjohtavuuden suhdetta $R = d/\lambda$. Homogeenisista ainekerroksista koostuvan rakenteen läpi kulkevan lämpövirran tiheys q saadaan laskettua kaavalla (2.19) kerroskohtaisten lämmönvastusten avulla.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Sigma R}, \quad (2.19)$$

Rakennuksen energiatehokkuuslaskelmissa tarkastellaan yleensä rakenteiden U-arvoja, eli lämmönläpäisykertoimia, joka on lämmönjohtavuuden vastaluku, $U = 1/R$. Lämmönjohtavuuden avulla rakenteen läpi kulkeutuva lämpövirran tiheys saadaan laskettua kaavalla $q = U(T_1 - T_2)$. (Hagentoft 2001)

2.2.2 Lämmön konvektio

Konvektio on lämmön siirtymistä kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Rakennusfysiikassa tarkastellaan yleensä ilman konvektiota. Konvektio jaetaan luonnolliseen konvektioon ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio syntyy lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista, jotka saavat ilmamassat liikkeelle. Pakotettu konvektio on ulkopuolisen tekijän esimerkiksi tuulen tai ilmanvaihtolaitteen aiheuttamaa virtausta. (Hagentoft 2001) Rakenteiden ulkopinnoilla pakotetun konvektion vaikutus on merkittävämpi, kun taas sisäpintoja tarkasteltaessa painoarvo on luonnollisella konvektiolla.

Konvektiivinen lämpövirran tiheys q_{conv} [W/m^2] pinnan ja ilman välillä voidaan laskea kaavalla (2.20). (Hagentoft 2001)

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T_s - T_a), \quad (2.20)$$

jossa

h_{conv} on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] ja
 $(T_s - T_a)$ on ilman ja materiaali-pinnan välinen lämpötilaero [K].

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin vaihtelee pinnan geometrian ja karheuden sekä virtauksen luonteen ja virtaavan aineen ominaisuuksien mukaan. (Vinha 2011)

Ilma liikkuu luonnollisen konvektion vaikutuksesta myös suljetussa ilmapälissä. Ilmavälin lämpimällä puolella ilma lämpenee ja nousee ylöspäin. Saavuttaessaan kylmemmän pinnan ilma jäähtyy ja painuu takaisin alas. Näin syntyvä konvektiovirtaus on sitä voimakkaampi, mitä suurempi lämpötilaero pintojen välillä vallitsee. Konvektiovirtaus heikentää pystyrakenteen lämmöneristävyyttä nopeuttamalla lämmönsiirtymistä ilmapälissä. (Vinha 2011)

Suljetun ilmapälin lämmönjohtavuuteen vaikuttavat johtuminen, konvektio ja säteily. Konvektion ja johtumisen osuus ilmapälin läpi kulkevasta kokonaislämpövirran tiheydestä voidaan laskea kaavalla (2.21). (Hagentoft 2001)

$$q_{\text{conv+cd}} = h_{\text{conv+cd}} \cdot (T_1 - T_2), \quad (2.21)$$

jossa

T_1 ja T_2 ovat pintojen lämpötilat [K] ja

$$h_{conv+cd} = \frac{\lambda_{air}}{d} + h_{conv}. \quad (2.22)$$

Konvektion osuus lämpövirrasta riippuu ilmapälin leveydestä ja pintojen välisestä lämpötilaerosta. Alle 10 mm leveässä suljetussa ilmapälinissä ei ajatella tapahtuvan konvektiota, jolloin lämpövirta koostuu pelkästään johtumisesta. (Hagentoft 2001)

Konvektiovirtausta voi tapahtua myös huokoisen materiaalin kuten mineraalivillan sisällä. Tätä ilmiötä kutsutaan sisäiseksi konvektioksi. (Vinha et. al 2013)

2.2.3 Lämpösäteily

Säteilyllä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisina aaltolina pinnalta toiselle ilman aineen välitystä. Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet emittoivat säteilyä ympäristöönsä. (Hagentoft 2001)

Säteily voidaan jakaa sen aallonpituuden λ perusteella lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Lyhytaaltainen säteily ($\lambda < 2,8 \text{ mm}$) koostuu auringon lähettämästä säteilystä sekä ilmakehästä ja pilvistä heijastuvasta diffuusista säteilystä ja käsittää myös näkyvän valon aallonpituusalueen 0,4...0,7 mm. Pitkäaaltoinen säteily ($\lambda > 2,8 \text{ mm}$) käsittää lämpösäteilyyn kuuluvan infrapunasäteilyn sekä mikro- ja radioaallot. (Hagentoft 2001 & Mills 1999)

Säteilyn osuessa materiaalin pinnalle osa siitä heijastuu pois, osa absorboituu kappaleeseen ja osa läpäisee materiaalin. Näitä säteilyn komponentteja kuvataan kertoimilla, joiden välillä pätee yhtälö (2.15). (Hagentoft 2001)

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (2.15)$$

jossa

ρ	on heijastuskerroin,
α	on absorptiokerroin ja
τ	on läpäisykerroin.

Kappaleen emittoima säteilyteho määräytyy sen lämpötilan ja pinnan tummuuden perusteella. Ideaalisen mustan kappaleen emittoima säteilyteho saadaan laskettua Stefan-Bolzmännin lain avulla kaavalla (2.16).

$$E_b = \sigma T^4, \quad (2.16)$$

jossa

σ	on Stefan-Bolzmännin vakio $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$ ja
T	on säteilyä emittoivan kappaleen pinnan lämpötila [K].

Todellisuudessa pinnan lähettämä säteilyteho ei vastaa ideaalisen mustankappaleen säteilytehoa. Säteilytehojen suhdetta kuvataan kappaleen emissiviteetillä ϵ (kaava 2.17). (Hagentoft 2001)

$$\epsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)}, \quad (2.17)$$

jossa

E on todellisen pinnan säteilyteho ja
 E_b on mustan kappaleen säteilyteho.

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa materiaalien pinnat oletetaan niin sanotuiksi harmaiksi pinnoiksi. Harmaiden pintojen välistä pitkäaaltoista säteilyä tarkasteltaessa voidaan käyttää Kirchhoffin lain mukaista yksinkertaistusta $\epsilon = \alpha$. Eli pinnan absorptionkerroin oletetaan samaksi kuin vastaavan aallonpituusalueen emissiviteetti. (Hagentoft 2001 & Mills 1999)

3. MAANVASTAISET SEINÄT

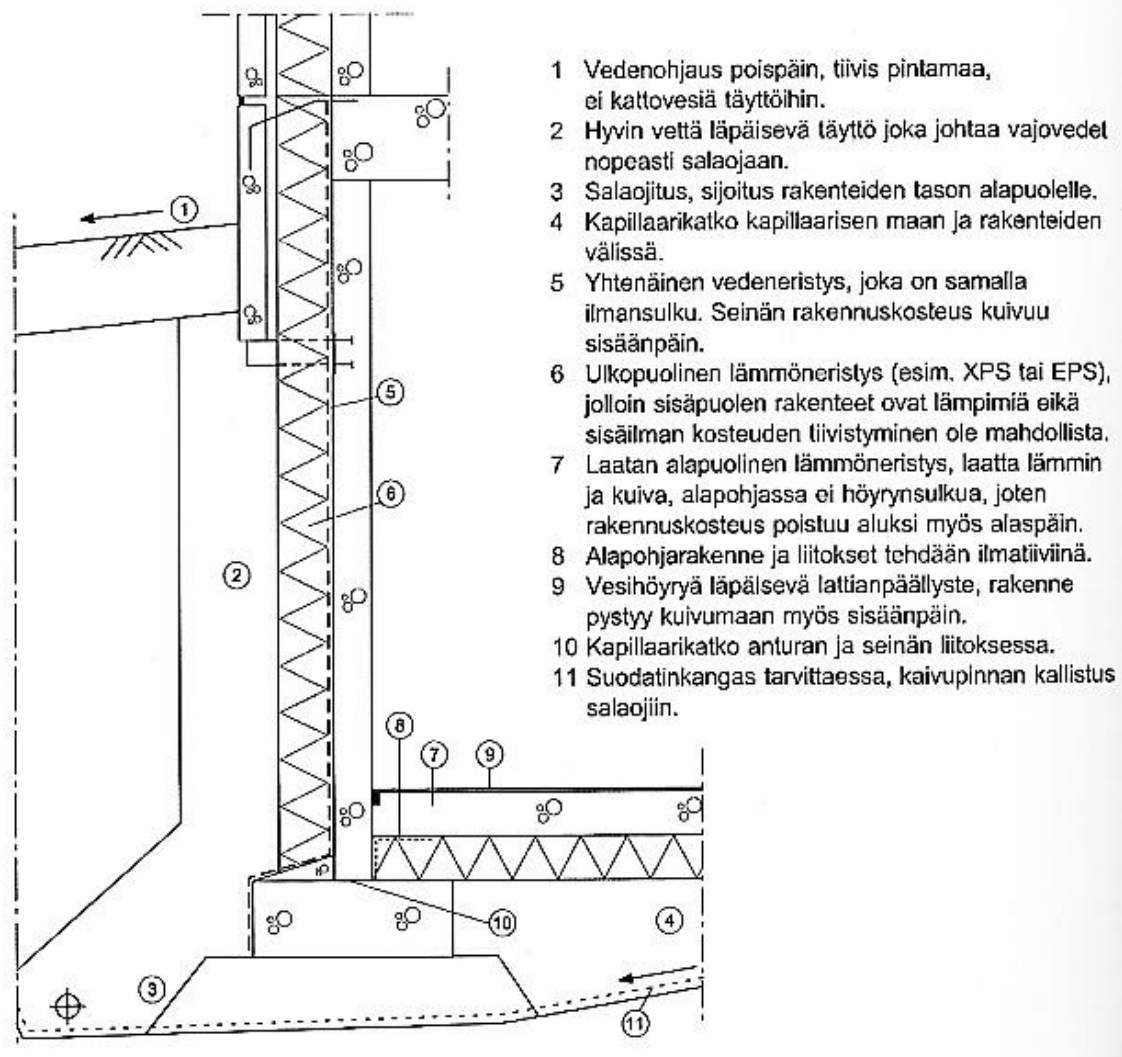
Maanvastaisten seinien kosteusteknisen toimivuuden kannalta on huomioitava seuraavat asiat (RIL 107-2012):

- rakennuspohjan kuivatus,
- sade- ja sulamisvesien hallinta,
- maaperän vedennousun ja kulkeutumisen hallinta,
- kosteuden nousun ja tunkeutumisen estäminen rakenteisiin sekä
- riittävä lämmöneristys.

Seuraavassa esitellään nykysuositusten mukainen toimiva rakenne, aiemmin toteutettujen rakenteiden ongelmia sekä käytössä olevat korjausratkaisut.

3.1 Toimiva rakenne

Toimivin maanvastaisen seinän rakenneratkaisu on niin kutsuttu käännetty rakenne (kuva 3.1), jossa vedeneristys on kantavan seinän ulkopinnassa ja lämmöneriste uloimpana rakennekerroksena. Vedeneriste on näin suojassa lämmöneristeen alla ja toimii myös rakenteen ilmansulkuna. Lämpimässä pinnassa vedeneristys estää kosteuden tiivistymisen rakenteeseen, mutta mahdollistaa rakenteen kuivumisen sisäänpäin. Lämmöneriste on suorassa kontaktissa kosteaan maahan, joten lämmöneristeenä tulee käyttää kosteutta kestäviä solumuovieristeitä. (RIL 255-1-2014) Maanvastaisen seinän näkyvä osa on tehtävä riittävän tiiviiksi, jotta sadevesi ei pääse imeytymään rakenteeseen. (RIL 107-2012)



Kuva 3.1 Käännetty rakenne ja sen kosteusteknisen toimivuuden saavuttamiseksi käytetyt keinot (RIL 225-1-2014).

Rakennuspohjan kuivatuksesta huolehditaan salaojituksella, joka koostuu salaojituskerroksesta ja sen pohjalle asennettavasta salaojaputkesta. Salaojituskerros katkaisee maaperästä nousevan kapillaarivirtauksen, pitää pohjaveden riittävällä etäisyydellä perustuksista ja estää maaperään imeytyvien pintavesien kulkeutumisen rakennuksen alle ja perustuksiin. Salaojituskerroksen tulee olla hyvin vettä läpäisevää tasarakeista ainesta, jotta se katkaisee kapillaarisen veden nousun tehokkaasti. Salaojaputki johtaa imeytyneen veden pois rakennuspohjasta. (RIL 107-2012) Maaperän kosteus voi nousta kapillaarisesti anturan kautta seinään vaikka salaojitus olisi kunnossa. Tämän vuoksi myös anturan ja seinän liitoksessa tulee olla kapillaarisen veden nousun katkaiseva vedeneriste. (Sisäilmayhdistys 2008)

Sade- ja sulamisvesien poisjohtamiseksi rakennusta ympäröivä maanpinta muotoillaan rakennuksesta pois päin viettäväksi. Vesi poistetaan rakennuksen läheisyydestä esimerkiksi sadevesiviemäreillä tai ojittamalla. (RIL 107-2012) Rakennuksen vierustäyttöjen

yläpinnassa käytetään vettä pidättäviä maalajeja, jotta pintavedet eivät pääse imeytymään täyttöihin. (RIL 255-1-2014)

Seinien ja lattian pinnoitteiden tulee olla vesihöyryä läpäiseviä ja kosteutta kestäviä. Suurialaisten kalusteiden tai kosteudelle arkojen tavaroiden sijoittamista seinärakenteisiin kiinni tulee välttää. (RIL 255-1-2014)

3.2 Lämpö- ja kosteusolosuhteet

Maanvastaisten rakenteiden lämpötilaan vaikuttavat ulkoilman sääolosuhteet, lämmöneristys ja sen sijoituskohta rakenteessa. Maanvastaisissa rakenteissa olosuhdemuutokset tapahtuvat tyypillisesti hitaammin kuin ulkoilmaan rajoittuvissa rakenteissa. Samoin rakennusten reuna-alueilla lämpö- ja kosteusolosuhteet vaihtelevat enemmän, kuin rakennuksen keskellä. Myös rakennuksen ikä vaikuttaa oleellisesti rakennusfysikaalisiin olosuhteisiin. Rakennuksen alapuolinen maa lämpenee ajan myötä, joten uuden rakennuksen kohdalla olosuhteet voivat olla hyvinkin erilaiset vanhaan rakennukseen verrattuna. (RIL 255-1-2014)

Maanvastaiset rakenteet altistuvat kosteusrasitukselle ulkoilman, sisäilman sekä maakontaktin kautta. Kosteutta jää rakenteisiin myös rakentamisaikana materiaaleihin sitoutuneena rakennuskosteutena. Rakennuskosteuden vaikutus on merkittävä erityisesti maanvastaisilla betonirakenteilla, jotka pääsevät kuivumaan vain yhteen suuntaan. (Leivo & Rantala 2002)

Kosteutta imeytyy maahan sadevedestä sekä kapillaarisen imun vaikutuksesta pohjaveden pinnasta. (Leivo & Rantala 2002) Maan huokostilassa oletetaan aina olevan vähintään 100 % suhteellinen kosteus, mikä tarkoittaa, että huokosilman vesihöyrypitoisuus kasvaa maan lämmitessä. Maanpinnan muodot, maaperän ja täyttökerrosten laatu ja pohjaveden korkeus vaikuttavat osaltaan rakenteiden kosteusrasitukseen. (RIL 255-1-2014)

Sisäilman olosuhteet vaihtelevat ulkopuolella vallitsevan sään mukaan. Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttaa lisäksi käytöstä ja ilmanvaihdosta riippuva sisäilman kosteustas. Kesällä käyttäjät ja asukkaat viettävät vähemmän aikaa sisätiloissa ja ovia ja ikkunoita pidetään auki, joten kosteustas on kesällä pienempi kuin talvella. Rakennusten sisäpuolella lämpötila pysyy kutakuinkin vakiona lämmityksen ja jäähdytyksen ansiosta. (RIL 255-1-2014)

Kellarin seinät ulottuvat yleensä myös maanpinnan yläpuolelle, jolloin niiden ulkopuolella vaikuttavat ulkoilman olosuhteet. Ulkoilmassa rakenteet altistuvat säärasituksille, joista rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa otetaan huomioon ilman lämpötila, ilman kosteuspitoisuus, sade, tuulesta aiheutuva viistosade sekä lyhyt- ja pitkä aaltainen säteily. (RIL 255-1-2014)

3.3 Ongelmat ja niiden syyt

Maanvastaisten seinien yleisimpiä kosteusongelmien aiheuttajia ovat puutteellinen vedeneristys ja salaojitus. 1940–1960 luvulla kellaritilojen vedeneristykseen ei kiinnitetty erityisesti huomiota, sillä ne olivat toissijaisessa käytössä. (Neuvonen 2006) Vedeneristys suositeltiin tehtävän kaksinkertaisena bitumisivelynä. Kylmien kellareiden osalta vedeneristeeksi riitti ohut savikerros tai sementtilaastirappaus. (Pirinen 1999)

1940–1950 luvun ohjeissa maanvastaisen seinien vedeneristys neuvottiin tekemään perusmuurin sisäpuolelle, jos sisäpuolella käytettiin verhomuurausta. (Pirinen 1999) Sisäpuolisessa vedeneristyksessä ongelmaksi muodostuu betonin läpi tunkeutuva kosteus, joka tuo mukanaan suoloja ja kalkkia, jotka irrottavat eristeen alustasta. Irronnut eriste vaurioituu herkästi ja sisäpuolelle asennetut lämmöneristeet pääsevät kastumaan. (Kärki & Öhman 2007)

Vuonna 1961 ilmestyi uusi ohje (RT 813.511 Kellarin seinä betonireikätiilestä), jossa kosteudeneristys käskettiin yksiselitteisesti tekemään maanvastaisen seinän ulkopintaan yksin- tai kaksinkertaisena bitumisivelynä. Hyvän rakentamistavan mukaisesti 60-luvulla rakennetut kellarit ovat siis kosteudeneristyksen osalta toimivia. Vuonna 1971 ohjekirjoihin tuli uutena täysin kosteuseristämätön rakenne, jonka kosteustekninen toiminta perustui ulkopuoliseen tuuletuskerrokseen. 1980-luvulla tuuletus hoidettiin yleensä muovisella salaojituslevyllä, mutta joissakin ohjeissa tuuletuskerrokseksi riitti pelkkä mineraalivilla. Tällainen rakenne on esitetty muun muassa vuoden 1985 Rakentajain kalenterissa. Mineraalivilla ei suojaa seinää millään tavalla vapaana vetenä liikkuvaa kosteutta vastaan, joten sade- ja sulamisvesien päästessä maan tiiviin pintakerroksen läpi maanvastaiset seinät ovat jatkuvasti kosteita. (Pirinen 1999)

Rakennukset on vaadittu salaojitettavaksi 1940-luvulta asti. 1945 ilmestyneen RT-kortin (RT 811.4 Salaojitus) ohjeet salaojista ja vierustäyttöjen materiaaleista ovat olleet selkeät, ja niiden mukaan toteutettuna maanvastaiset rakenteet toimivat hyvin. (Pirinen 1999) Todellisuudessa ohjeita ei ole kuitenkaan aina noudatettu, vaan täytöt on saatettu tehdä tontin omilla kaivumailla, salaojia ei ole asennettu tai ne ovat ajan saatossa tukkeutuneet (SPU). 1971 päivitettyssä ohjeessa (RT 811.41 Salaojat, perustukset tiiliputki) annettiin rakentajalle mahdollisuus jättää rakennus salaojittamatta sora- ja hiekkamaille perustettaessa. Uusi ohje aiheutti aikanaan virheellisiä perustusratkaisuja, kun moreenimaita tulkittiin virheellisesti hiekaksi. Ongelmat rajoittuvat kuitenkin pääosin ker-tarakentajien rakentamiin omakotitaloihin, sillä samaan aikaan ilmestyi ammattilaisille suunnattu ohje (RIL 81 Rakennuspaikan salaojitus), jossa tontin salaojitustarve pääteltiin ohjeissa annettujen rakeisuuskäyrien perusteella, eli maapohjalle vaadittiin aina rakeisuustutkimus. (Pirinen 1999) Salaojien ja vedeneristeen puuttuminen mahdollistavat kosteuden kapillaarisen nousun seinään. Vesi voi päästä seinään myös perustusten kautta, jos perustusten alla ei ole käytetty kapillaarista nousua katkaisevaa sorakerrosta. (Kärki & Öhman 2007)

70-luvulla julkaistun RT-kortin ohjeiden mukaan salaojaputket saatiin sijoittaa routarajan yläpuolelle, kunhan varmistuttiin siitä, että putket pystyvät tyhjentymään vedestä pakkaskauden ajaksi. Routaeristeitä ei tällöin vielä vaadittu rakennusten ulkopuolelle, joten putkien jäätyminen aiheuttamat kosteusvauriot kevätaikaan ovat yleisiä aikakauden rakennuksissa. (Pirinen 1999, s. 34–35)

Kellaritilojen lämmöneristys on usein asuinkerroksia heikompi. (Neuvonen 2006) Maanvastaisten rakenteiden puutteellinen lämmöneristäminen aiheuttaa maapohjan lämpenemistä. Maan lämmitessä sen huokosilman vesihöyrypitoisuus kasvaa ja kosteutta alkaa siirtyä diffuusiolla maasta rakenteisiin. (RIL 250-2011)

1940-luvulla maanvastaiset seinät valettiin usein betonista tai muurattiin betonireikätiilistä. Lämmöneristeenä toimi tuuletusraollinen tiilimuuraus. 1950-luvulta lähtien lämmöneristysmateriaalit kehittyivät ja maanvastaissa seinissä alettiin käyttää sementtilastuvillalevyä (Toja-levy) sekä puukoolattua mineraalivillaa. Lämmöneristeet sijoitettiin seinän sisäpuolelle. Vasta vuonna 1979 julkaistussa rakennusinsinöörien liiton ohjeessa (RIL 117, Lämmön- ja kosteudeneristys) esiteltiin vaihtoehtoisena lämmöneristystapana ulkopuolinen lämmöneristys. (Pirinen 1999)

Seinän sisäpuolinen eristäminen laskee betonirakenteen lämpötilaa niin, että kosteutta alkaa tiivistyä lämmöneristeen ja betoniseinän rajapintaan. Puukoolaukset, mineraalivilla ja Toja-levy ovat herkästi homehtuvia materiaaleja, joten mikrobivauriot ovat yleisiä tällaisissa rakenteissa. Toisinaan lämmöneristeen päälle on asennettu höyrynsulku estämään kosteuden pääsy eristekerrokseen. Höyrynsulkumateriaalina on käytetty korjausajankohdasta riippuen muovia tai tervapaperia. (Kärki & Öhman 2007) Jos höyrynsulku asennetaan ulkopuolelta vedeneristettyyn seinään, rakenne ei pääse enää kuivumaan sisäänpäin, ja vuotokohtien kautta rakenteeseen pääsevä kosteus aiheuttaa herkästi kosteusvaurioita. (RIL 250-2011)

Vanhojen rakenteiden korjaustyössä on huomioitava terveydelle haitalliset aineet. Kellaritiloissa vanhojen putkien eristeenä on usein käytetty asbestia. Lisäksi maanvastaisen seinän tiiliverhouksen ja perustusrakenteen välissä olevat vedeneristeet saattavat sisältää kreosoottia eli kivihiilitervaa, joka on terveydelle vaarallinen aine ja on poistettava tai kapseloitava paikalleen. (Neuvonen 2006)

3.4 Nykyiset korjausratkaisut ja lisäeristäminen

Maanvastaisten seinien lisälämmöneristämiseen ryhdytään yleensä, kun vanhat kylmät kellaritilat halutaan ottaa hyötykäyttöön. Korjaustarve voi syntyä myös lämmityskustannusten noustessa liian suuriksi. Kellaritilojen käyttötarkoituksen muutos vaatii rakenteiden perusteellista tutkimista ja korjaamista. Rakenteiden kosteusrasitukset on minimoitava ja terveydelle haitallisten aineiden, kuten radonin tai mikrobien, pääsy sisäil-

maan on estettävä. On myös tärkeää huolehtia ilmanvaihdon riittävydestä kellaritiloissa.

3.4.1 Vedeneristysten korjaus

Jos maanvastaisissa rakenteissa havaitaan liiallista kosteutta, on kosteuslähde selvitettävä ja korjattava ennen uusien lämmöneristeiden asennusta. Kosteuden- ja vedeneristyskorjaukset voidaan tehdä ulko- tai sisäpuolelta. Helppopääsyisissä kohteissa korjaukset on syytä toteuttaa ensisijaisesti ulkopuolisena korjauksena. Vaikeapääsyisissä kohteissa vuotokorjaukset voidaan tehdä myös sisäpuolelta. Vain vesimäärältään hyvin pienissä vuototapauksissa voidaan käyttää materiaaleja, jotka rajoittavat veden haihtumista sisäpuolelle. (RT 83-10955)

Vedeneristeenä käytetään kermieristeitä, massaeristeitä tai perusmuurilevyä. Perusmuurilevy on ns. epäjatkuva vedeneristys, jota voidaan käyttää vain, kun pohjaveden pinta on pysyvästi perustamistason alapuolella. Levyn nystyräpintainen rakenne muodostaa ilmaraon seinän ja eristeen väliin. Sisältäpäin tuleva kosteus tiivistyy levyn sisäpintaan ja valuu levyä pitkin maahan tai salaojiin. Kermi- ja massaeristeet toimivat jatkuvana vedeneristeenä ja niitä voidaan käyttää myös vedenpaineelle altistuvissa rakenteissa. (RT 83-10955)

Perusmuurien kuivatus voidaan toteuttaa myös pystysalaojalevyllä. Pystysalaojalevyt valmistetaan liimaamalla yhteen solumuovipalloja tarkoitukseen sopivalla liima-aineella. Levyt asennetaan perusmuuria vasten ja suojataan suodatinkankaalla. Levyt katkaisevat kapillaarisen kosteuden nousun ja johtavat perusmuurin viereen kulkeutuneen veden salaojiin. Levyt toimivat samalla lämmöneristeenä, mutta eivät vedeneristeenä. Pohjaveden pinnan on siis pysyttävä selvästi rakenteiden alapuolella eikä seinän viereen saa kulkeutua suuria määriä vettä. (RT 83-10955) Koska seinää ei vedeneristetä ulkopuolelta, pystysalaojalevyillä tehdyssä kuivatusjärjestelmässä on kosteusvaurion riski salaojien tukkeutuessa tai esimerkiksi putkirikon sattuessa. Kosteutta voi kulkeutua levyn läpi myös diffuusiolla.

Kapillaarisen veden nousun katkaisemiseksi seinään voidaan asentaa vaakasuuntainen vedeneristys. Eristys tehdään yleensä mekaanisesti poraamalla tai sahaamalla seinään ura, johon asennetaan tiivistävä materiaali levynä tai massatäyttönä. (Palviainen 2010) Kapillaarikatko voidaan toteuttaa myös injektointimenetelmällä, joka eivät vaadi vierusmaan poistoa. Injektointia voidaan käyttää tiili- ja betonirakenteiden ulkoseinien sekä täyttömaan tiivistykseen. Injektoinnissa rakenteen läpi porataan reikiä tasaisin välimatkoin, joiden läpi tiivistysaine injektoidaan rakenteeseen. Tiivistysaine täyttää maassa tai rakenteessa olevat kapillaarihuokokset ja estää näin veden kapillaarisen nousun. (RT 83-10955)

3.4.2 Lämmöneristysten korjaus

Lämmöneristysratkaisuja on myös olemassa niin sisä- kuin ulkopuolisenakin menetelmänä. Ulkopuolinen salaojitus- ja lämmöneristyskorjaus on yleensä varmin ratkaisu. Ulkopuoliseen korjaukseen ryhtyminen on perusteltua ainakin seuraavissa tapauksissa:

- Rakennuksen vierusmaa avataan muiden syiden takia.
- Rakennuksessa tehdään pihakorjauksia, jotka estävät vedeneristeen uusimisen myöhemmin.
- Kellaritilojen käyttötarkoitusta muutetaan niin, että olosuhteet muuttuvat radikaalisti.
- Kellariin nousee pohjavettä tai seinän läpi havaitaan vesivuotoja.
- Maaperän kosteus kastelee seinää sen koko alalta, eli ei ole kyse pelkästä kapillaarisesta noususta tai paikallisesti maahan imeytyvistä pintavesistä.

Ulkopuolisessa korjauksessa maanvastaisen seinän vierusmaa poistetaan. Kaivanto ulotetaan hieman anturan alapinnan tasoa alemmaksi. Seinän pintaan asennetaan vedeneristys ja uloimmaksi lämmöneristys. Ulkopuolisena lämmöneristeenä käytetään solumuovieristeitä: EPS-, XPS- tai polyuretaanilevyjä. Solumuovieristeet toimivat hyvin kosteissa olosuhteissa ja estävät myös kosteuden pääsyä rakenteeseen. Eristeiden asennuksen jälkeen kaivanto täytetään salaojasoralla tai sepelillä, joka erotetaan perusmaasta suodatinkankaalla. (Kärki & Öhman 2007) Maanvastaisen seinän maanpinnan yläpuolinen osa eristetään vähintään samantasoisella lämmöneristyksellä kuin maanpinnan alapuolella. (YM 2012)

Jos ulkopuolista korjausta ei ole mahdollista toteuttaa esimerkiksi rakennussuojelullisista syistä, kaivuolosuhteiden takia tai se arvioidaan kustannuksiltaan kohtuuttomaksi, on olemassa myös sisäpuolisia lämmöneristysvaihtoehtoja. Maanvastaisten seinien sisäpuolisesta lämmöneristämisestä on olemassa erilaisia ohjeistuksia muun muassa huokoisilla mineraalilevyillä tai polyuretaanieristeellä. Suomessa näistä menetelmistä on kuitenkin hyvin vähän tutkittua tietoa. Tämän tutkimuksen tavoitteena onkin arvioida tarjolla olevien menetelmien kosteusteknistä toimivuutta Suomen sääolosuhteissa ja antaa suosituksia maanvastaisten seinien rakennusfysikaaliseen toteutukseen.

Sisäpuoliseen lämmöneristämiseen suositellaan käytettävän kapillaarisesti aktiivista mineraalilevyä, kuten kalsiumsilikaattilevyä, josta on saatu hyviä kokemuksia Keski-Euroopassa. Kalsiumsilikaattilevyjen käyttöä sisäpuolisena lämmöneristeenä on tutkittu muun muassa EU:n tuella toteutetussa INSUMAT-tutkimuksessa. Materiaali varastoi kosteutta itseensä ja luovuttaa sen vähitellen sisäilmaan. Kalsiumsilikaatti on alkalista (~ pH 10), mikä estää tehokkaasti homeen kasvua. Levyt kiinnitetään puhdistettuun seinään sementtilastilla ja tarvittaessa mekaanisin kiinnikkein. Levyn pinta käsitellään pohjusteella ja viimeistellään halutulla diffuusioavoimella pinnoitteella. (Sisäilmayhdistys 2008) Rakenteessa ei käytetä höyrynsulkua, koska se estäisi rakenteen kuivumisen

sisäänpäin. Sisäpuolisen lämmöneristyksen etuna on lämmöneristeen ulottuminen koko seinän alalle, mikä vähentää kylmäsiltoja seinän maanpinnan yläpuolisessa osassa.

3.4.3 Energiämääräykset korjausrakentamisessa

Korjausrakentamisen energiatehokkuuden parannusvaatimuksista määrätään 27.2.2013 julkaistussa Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä (YM 2013). Asetuksen mukaan rakennuksen luvanvaraisen korjauksen, käyttötarkoituksen muuttamisen tai teknisten järjestelmien uusimisen yhteydessä sen energiatehokkuutta on parannettava. Rakennuksen energiatehokkuutta voidaan parantaa vaihtoehtoisesti

1. parantamalla rakennusosakohtaisia U-arvoja vaatimusten mukaan,
2. rakennuksen standardikäyttöön perustuvaa rakennuksen pinta-alaan suhteutettua energiankulutusta pienentämällä tai
3. pienentämällä rakennuksen E-lukua rakennusluokan vaatimalle tasolle. (YM 2013)

Yksinkertaisimmin määräystenmukaisuus voidaan osoittaa parantamalla rakennusosakohtaisia U-arvoja vaatimusten mukaan, jolloin U-arvot tulee joko puolittaa tai parantaa rakennusten energiatehokkuus määräysten (RakMK D3) mukaisia vertailuarvoja vastaavaksi. Vertailuarvot ovat:

- ulkoseinälle $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja
- maata vasten olevalle rakennusosalle $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT

Tässä kappaleessa esitellään laskennallisten tarkasteluiden lähtötiedot sekä rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arviointimenetelmänä käytetty suomalainen homemalli.

4.1 Materiaaliominaisuudet

Materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet on tunnettava, jotta simuloinnin tulokset vastaavat rakenteen todellista toimintaa. Keskeisimpiin materiaaliominaisuuksiin kuuluu muun muassa:

- lämmönjohtavuus
- ominaislämpökapasiteetti
- ilmanläpäisevyys
- vesihöyrynläpäisevyys
- kosteuden läpäisevyys / kosteusdiffusiviteetti
- tasapainokosteuskäyrä
- pinnan emissiviteetti/absorptiokerroin. (RIL 255-1-2014)

Tarvittavat ominaisuudet vaihtelevat materiaalin roolin mukaan. Esimerkiksi kosteuden eristeenä toimivan bitumikermien lämmönjohtavuudella ei ole suurta merkitystä rakenteen toiminnan kannalta, koska kerroksen paksuus on hyvin pieni.

Maanvastaisia rakenteita mallinnettaessa on tärkeää tuntea maalajien lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Suomen maalajeille näitä ominaisuuksia on tällä hetkellä taltioitu hyvin suppeasti. Maalajin tiheys r määräytyy sen mineraalikoostumuksen ja eloperäisen aineksen määrän perusteella. Suomessa maalajien tiheys on lähes vakio. Kitkamaalajien keskimääräinen tiheys on 2650 kg/m^3 . (Ronkainen 2012)

Simulaatioissa käytetyt maalajien materiaaliominaisuudet perustuvat Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa (Kehrer et al 2012) määritettyihin arvoihin. Perusmaan materiaaliksi valittiin hiekka (sand) ja salaojasorana käytettiin materiaalia sora (gravel). Perusmaassa suhteellisen kosteuden oletetaan jatkuvasti pysyvän 100 %:ssa (RIL 255-1-2014), joten maa on aina kapillaarisella alueella. Perusmaan kohdalla hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän muodolla ei siis ole vaikutusta simuloinnin tuloksiin. Tärkeintä on, että materiaalilla on riittävä kapillaarinen kosteudenjohtavuus.

Simuloinneissa käytettiin Delphin-ohjelman materiaalikirjastosta löytyviä materiaaleja. Materiaalikirjaston tuotteita verrattiin suomalaisiin kirjallisuusarvoihin (RIL 255-1-

2014 & YM 2012), minkä perusteella valittiin todellisia käytettyjä tuotteita vastaavat materiaalit. Kaikki simulaatioissa käytettyjen materiaalien ominaisuudet on esitetty liitteessä A.

Työssä hyödynnettiin TTY:n laboratoriossa mitattuja kalsiumsilikaattilevyjen materiaaliominaisuuksia. Laboratoriossa testattiin neljää eri Suomessa saatavilla olevaa kalsiumsilikaattilevyä. Kullekin levyille määritettiin tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti sekä kapillariteettikerroin. Mitattuja arvoja verrattiin Delphin-ohjelman materiaalkirjastosta löytyviin tuotteisiin, joista valittiin parhaiten vastaavat. Simulaatioihin valittiin kaksi kosteusteknisesti erityyppistä levyä: CaSi 1 ja CaSi 2. CaSi 1 -levyllä on korkeampi lämmönjohtavuus ja pienempi kapillariteettikerroin. CaSi 2 on lämmöneristys- ja kosteudensiirtokyvyltään parempi (ks. liite A). Kalsiumsilikaattilevyt kiinnitetään betonin pintaan erikoislaastilla. Laastin rakennusfysikaaliset ominaisuudet ovat hyvin lähellä alustana olevaa betonia, joten simulaatioita voitiin yksinkertaistaa jättämällä laastikerros mallintamatta.

Ohuet kosteudeneristyskerrokset mallinnettiin rakenteisiin materiaalikerrosten välisenä pintavastuksena. Pintavastus määritellään Delphinissä materiaalin suhteellisen diffusionvastuksen s_d ja kapillaarisen kosteuden vastuksen avulla. Mallintamalla kosteudeneristys pintavastuksena erillisen materiaalikerroksen sijaan simulointiin kuluva laskenta-aikaa saatiin lyhennettyä.

Kirjallisuudessa bitumin m_{arvot} vaihtelevat 10000...50000 välillä. Simulaatioissa vedeneristeenä toimivan bitumikerman $m_{arvoksi}$ annettiin 100000 ja se mallinnettiin 1 mm paksuisena. Näin ollen kermin s_d -arvoksi tulee 100 m. Tämä kuvaa ideaalitapausta, jossa vedeneristyskerros on täysin ehjä. Mahdollisten vuotojen aiheuttamia kosteusrasituksia ei otettu huomioon simulaatioissa.

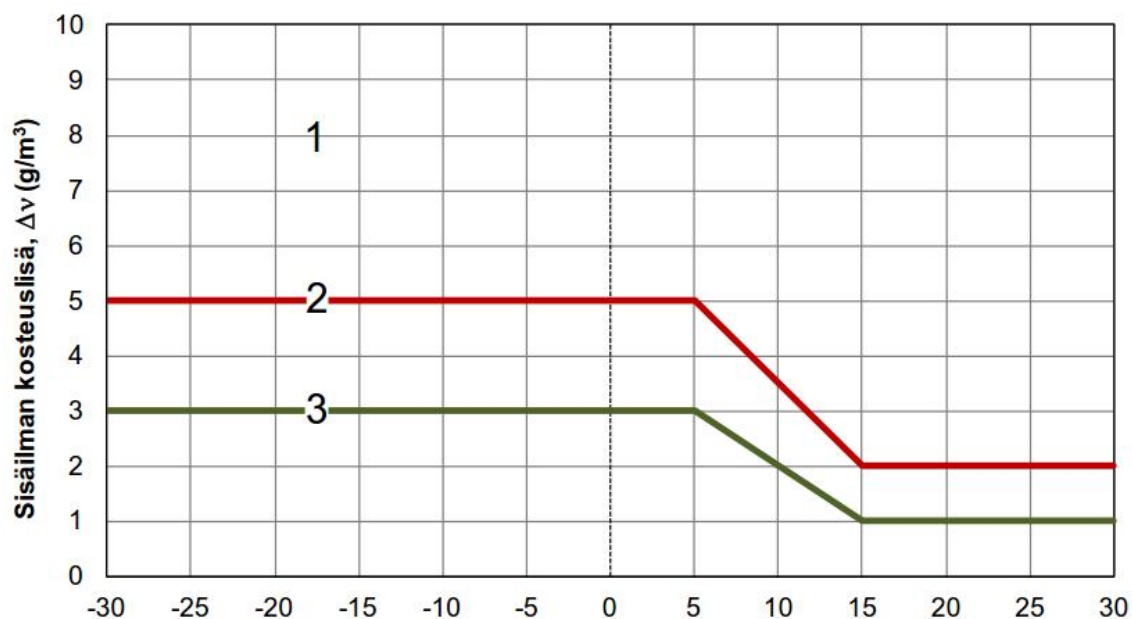
4.2 Mitoittavat sisä- ja ulkoilman olosuhteet

Mitoittavina ulkoilman olosuhteina käytetään Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) toteuttamassa FRAME-hankkeessa määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuotia. Nykyilmaston kriittisiksi testivuotiksi Suomessa on määritetty Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Jokioisen 2004 testivuoden olosuhteet soveltuvat laskelmiin, joissa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa pääosin ulkoilman suhteellinen kosteus. Vantaan 2007 testivuosi taas soveltuu laskelmiin, joissa kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa suhteellisen kosteuden lisäksi myös sade tai viistosade. (Vinha et al. 2013)

Vantaan 2007 testivuotta käytettäessä ulkoseinän ilmansuunnaksi valitaan etelä, koska viistosade on siellä voimakkainta ja auringon säteily voimistaa ulkoilman suhteellisen kosteuden siirtymistä rakenteen sisäosiin diffuusiolla. Jokioisen 2004 testivuoden yhteydessä tarkasteltavan rakenteen ilmansuunnaksi valitaan pohjoinen, jossa auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin. (Vinha et al. 2013)

Sisäpuolelta eristetyille massiivirakenteille suositellaan käytettävän Jokioisen testivuotta. (Vinha et al. 2013) Maanvastaisia seiniä tarkasteltaessa suurimmat kosteusrasitukset aiheutuvat ilman suhteellisesta kosteudesta, maahan imeytyneestä sadevedestä sekä maakosteuden kapillaarisesta noususta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa maan kosteuspitoisuus oletetaan pysyvän koko ajan 100 % RH:ssa, jolloin testivuoden sademäärällä ei ole vaikutusta maan kautta rakenteeseen kulkeutuvaan kosteuteen. Sademäärän vaikutus voidaan siis olettaa maanvastaisten seinärakenteiden kannalta pieneksi, mikä puoltaa myös Jokioisen testivuoden valintaa. Jokioisen 2004 testivuoden ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden käyrät on esitetty liitteessä B.

Sisäilman olosuhteina käytetään RIL 107:ssä (2012) esitettyjä lämpötilan ja kosteuslisän mitoitusarvoja. Sisäilman vesihöyrypitoisuus mukailee ulkoilman olosuhteita. Rakennuksen käyttöön liittyvät toiminnot aiheuttavat lisäksi sisäilmaan kosteuslisän, joka vaihtelee rakennuksen käytön ja ulkoilman lämpötilan mukaan. Sisäilman kosteuslisä ilmaisee sisä- ja ulkoilman välisen vesihöyrypitoisuuseron (g/m^3). Suomessa käytettävät kosteuslisän mitoitusarvot on esitetty kuvassa 4.1. Rakennuksen kosteusluokka valitaan taulukon 4.1 mukaan. (RIL 107 2012)



Kuva 4.1 Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107 2012).

Taulukko 4.1 Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyyppit (RIL 107 2012).

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitussarvo talvella ($T \leq 5\text{ °C}$)	Rakennustyyppi ^{3,4}
1	$> 5\text{ g/m}^3$ ¹	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat ^{5,6} , kylmä- ja pakkashuoneet ^{5,6} , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ²	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

¹ Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä $6\text{--}20\text{ g/m}^3$.

² Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa 3 g/m^3 , ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³ Eri rakennustyyppisiin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

⁴ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

⁵ Jäähdytettävien tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisä voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

⁶ Jäähdytettävien tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Palvelurakennukset kuuluvat joko kosteusluokkaan 1 tai 2. Kosteusluokassa 1 kosteuslisät vaihtelevat suuresti ja mitoitussarvot on määritettävä kohdekohtaisesti (RIL 107 2012), joten ei ole mielekästä tarkastella tämän tyyppisiä erikoistapauksia. Laskelmissa käytetään kosteusluokan 2 mitoitussarvoja, jotka pätevät suurelle osalle palvelurakennuksista.

4.3 Laskennan alkuolosuhteet

Kaikissa simulaatioissa pohjaveden pinnan oletetaan pysyvän perustamistason alapuolella, joten seinän alareunaan ei asetettu suoraa kontaktia vapaan veden pintaan. Todellisuudessa kapillaarinen maa-aines voi nostaa pohjaveden pinnan perustusten tasolle, jos kapillaarisen veden nousun katkaisevaa sorakerrosta ei ole. Tällaisissa tapauksissa kapillaarinen veden nousu seinään on huomattavasti voimakkaampaa, kuin nyt tutkituissa rakenteissa. Tutkimustulokset eivät siis päde rakenteisiin, jotka ovat suoraan tai kapillaarisen maakerroksen kautta kosketuksissa vapaan veden pintaan.

Kun rakenne ei ole kapillaarisesti kytköksissä pohjaveden pintaan, maakosteus simulaatioissa voidaan huomioida asettamalla seinän ulkopinnan suhteellinen kosteus arvoon

100 % RH tai vaihtoehtoisesti mallintamalla seinän ulkopuolelle ei-kapillaarinen maakerros, jonka ulkopinnalla on vesikontakti. Vesikontaktireunaehdon käyttäminen kuitenkin hidasti laskenta-aikaa niin, että sen käyttäminen ei ollut näissä tapauksissa mahdollista. Tästä syystä simulaatioissa maakosteus mallinnettiin käyttämällä 100 % RH reunaehto. Maakerroksen alkukosteudeksi määritettiin 99 % RH, koska laskenta ei käynnisty suhteellisen kosteuden ollessa 100 % RH. Alkuolosuhteet siis vastaavat tilannetta, jossa perustusten alla on kapillaarisen kosteuden nousun katkaiseva sorakerros.

Simulaatioiden alussa vanhat rakenneosat asetettiin suhteelliseen kosteuteen 97 % RH ja lämpötilaan 7 °C. Malleissa, joissa olemassa oleva seinä on erikseen määritetty kuivatettavaksi, betonin suhteellinen kosteus seinässä asetettiin 80 %:iin RH. Uudet lämmöneristeet ajatellaan säilytettävän säältä suojattuna, joten niiden alkukosteus on myös vanhoja rakenteita matalampi: 80 % RH.

4.4 Homeindeksi

Rakenteiden homehtumisriskit selvitetään suomalaisen homemallin (Vinha et al. 2011) avulla. Homemallin mukaan homeenkasvun edellytyksiä ovat riittävän korkea lämpötila sekä suhteellinen kosteus. Myös sopivien olosuhteiden vaikutusaika, ravinteet ja materiaalin homehtumisherkyys vaikuttavat homeenkasvuun. (Vinha et al. 2011) Homemallissa tunnin välein mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella lasketaan materiaalin tai kahden materiaalin välisen rajapinnan homeindeksi M . Homeindeksin luokitusperusteet on esitetty taulukossa 4.2. Kun homeindeksi maksimiarvo (M_{\max}) on alle yhden, materiaalien pinnoilla ei esiinny homeenkasvua. $M_{\max} < 1,0$ voidaan siis pitää kriteerinä terveelle rakenteelle. Raja-arvo ei saa ylittyä kantavissa rakenteissa eikä sen sisäpuolisissa lämmöneriste- tai rakennekerroksissa. Maanvastaisten rakenteiden ulkopinnalla homeenkasvu joudutaan hyväksymään, koska maassa vallitsevissa olosuhteissa homeindeksi nousee väistämättä korkeaksi.

Taulukko 4.2 Homeindeksin luokitusperusteet.

Home- indeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) TAI Mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta TAI Mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

On hyvä huomata, että homeindeksi kuvaa vain homeenmuodostumisen määrää eikä ota kantaa homeiden laatuun tai toksisuuteen. Kestävissä materiaaleissa homeet joutuvat taistelemaan elinolosuhteista ja kehittyvät siten yleensä toksisemmiksi kuin herkästi homehtuvissa materiaaleissa. (Vinha et al. 2011)

Homemallissa materiaalit jaetaan homeherkkyysluokkiin (HHL), jotka kuvaavat materiaalin homehtumisriskiä. Herkkyysluokat erityyppisille materiaaleille on esitetty taulukossa 4.3. Homehtumisherkkyysluokat on määriteltä kullekin materiaalille erikseen homeen kasvunopeudelle ja homeen maksimimäärälle. Kun tarkastellaan yhtä materiaalia, homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokat ovat yleensä samat. Kevytbetoni muodostaa erikoistapauksen, jossa homehtumisriski määräytyy kahden eri luokan perusteella. Kevytbetonille homeen kasvunopeus määräytyy herkän luokan mukaan, kun taas maksimimäärä lasketaan kohtalaisen kestävä luokan perusteella. Kahden materiaalin välisessä rajapinnassa molemmat materiaalit voivat vaikuttaa homeen kasvunopeuteen, joten kasvunopeus määräytyy rajapinnan herkemman materiaalin mukaan ja maksimimäärä tarkasteltavan materiaalin perusteella. (Vinha et al. 2011)

Taulukko 4.3

Rakennusmateriaalien luokittelu homemallin mukaisiin homehtumisherkeyytsluokkiin.

Homehtumis-herkkyysluokka	Materiaalit
Hyvin herkkä HHL1	karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL2	höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL3	mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL4	lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuojaimaineita sisältävät materiaalit

Lämpötilan laskiessa 0 °C:n alapuolelle tai materiaalin kuivuessa alkaa homeen taantuma. Taantumien vaikutusta eri materiaaleissa kuvataan taantumaluokilla, jotka vastaavat homehtumisherkeyytsluokkia taulukon 4.4 mukaisesti. (Vinha et al. 2013)

Taulukko 4.4

Materiaalien taantumaluokat.

Homehtumis-herkkyysluokka	Homeenkasvun taantumaluokka
Hyvin herkkä HHL1	Merkittävä taantuma HTL2
Herkkä HHL2	Kohtalainen taantuma HTL3
Kohtalaisen kestävä HHL3	Vähäinen taantuma HTL4
Kestävä HHL4	Vähäinen taantuma HTL4

Kalsiumsilikaattieristeen herkkyys- ja taantumaluokkia ei ole määritetty. Kalsiumsilikaatti on alkalinen materiaali (pH > 10), joten sen voidaan arvioida sijoittuvan tuoreen betonin kanssa samaan luokkaan. Jotta oltaisiin homeenkasvun kannalta varmemmalla puolella, käytetään kalsiumsilikaatille homehtumisherkeyytsluokkaa 3 kohtalaisen kestävä ja taantumakerrointa 0,1 vähäinen taantuma.

Homeen muodostuminen vaatii sitä suuremman suhteellisen kosteuden, mitä alhaisempi lämpötila rakenteessa vallitsee. Tietyissä lämpötilassa homeenkasvulle vaadittavan suhteellisen kosteuden raja RH_{crit} noudattaa kaavan (4.1) mukaista käyrää. (Vinha et al. 2011)

$$RH_{crit} = \begin{cases} \max(-0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, RH_{min}) & \text{kun } T \leq 20^\circ C \\ RH_{min} & \text{kun } T > 20^\circ C \end{cases}, \quad (4.1)$$

missä

T = lämpötila [$^\circ C$]

RH_{min} = suhteellisen kosteuden minimiarvo materiaalilla, joka vaaditaan homekasvun alkamiseen

Herkille ja hyvin herkille materiaaleille $RH_{min} = 80\%$ RH ja kohtalaisen kestäväille tai kestäväille $RH_{min} = 85\%$ RH. Kriittisen rajan RH_{crit} alapuolella olevaa suhteellista kosteutta pidetään homeen kannalta ns. kuivana aikana, jolloin homeen kasvu lähtee taantumaan. Homeen kasvu ei myöskään ole mahdollista yli $50^\circ C$:n lämpötilassa. (Vinha et al. 2011)

Homeindeksin laskentaan käytetään homeriskien laskennalliseen arviointiin tarkoitettua excel-pohjaa sekä rakennusfysiikan tutkimusryhmän käytössä olevaa Python-ohjelmointikielellä kirjoitettua ohjelmaa. Homeindeksiä tarkastellaan yhden vuoden ajanjaksolla. Homemalliin tuodaan lämpö- ja RH-data simulaation viimeisen vuoden ajalta.

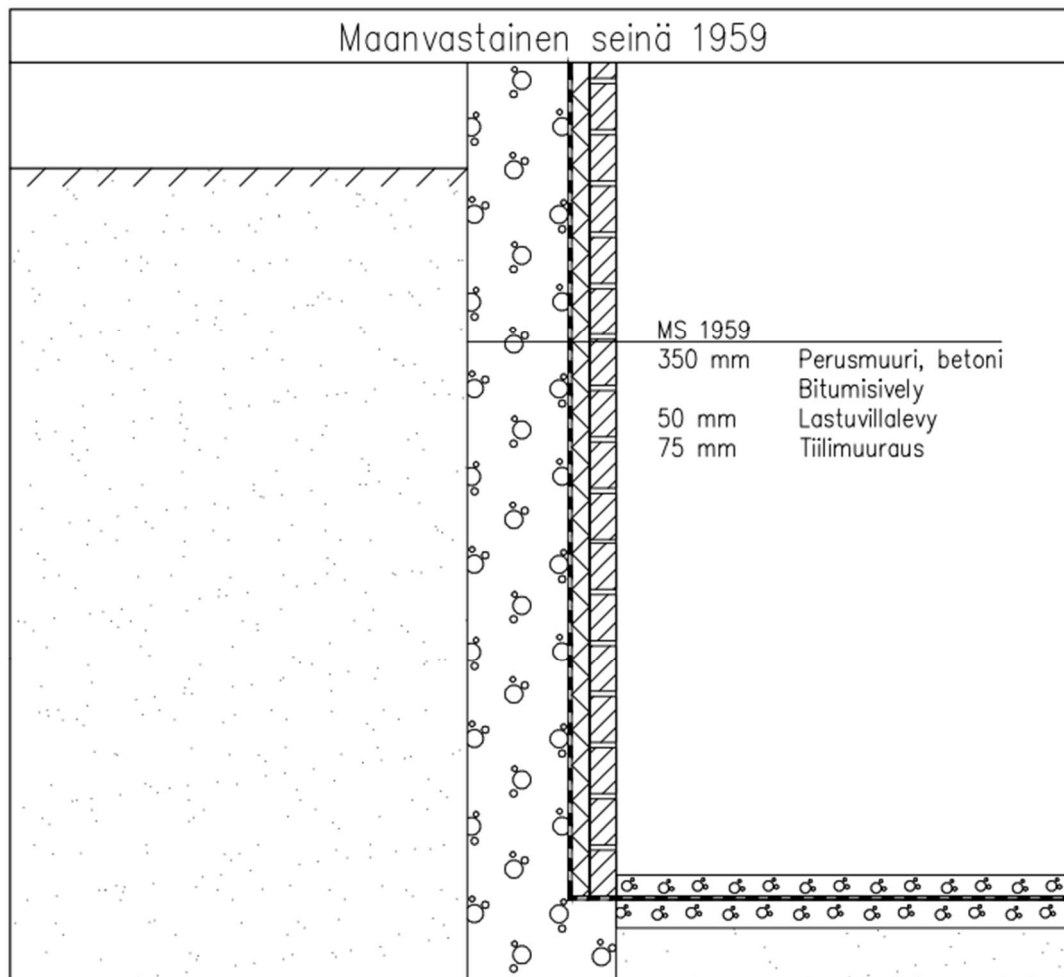
5. SIMULAATIOT

Laskennallisten tarkasteluiden tavoitteena on tutkia sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutuksia maanvastaisen seinän kosteustekniseen toimintaan. Simulaatioiden avulla selvitetään lämpö- ja kosteuskenttien muutokset rakenteissa. Tuloksista voidaan päätellä kondensoituuko materiaalien rajapintoihin kosteutta, kuivuuko rakenne riittävästi ja syntyykö rakenteeseen homeenkasvulle suotuisat olosuhteet.

5.1 Tutkittavat rakenteet

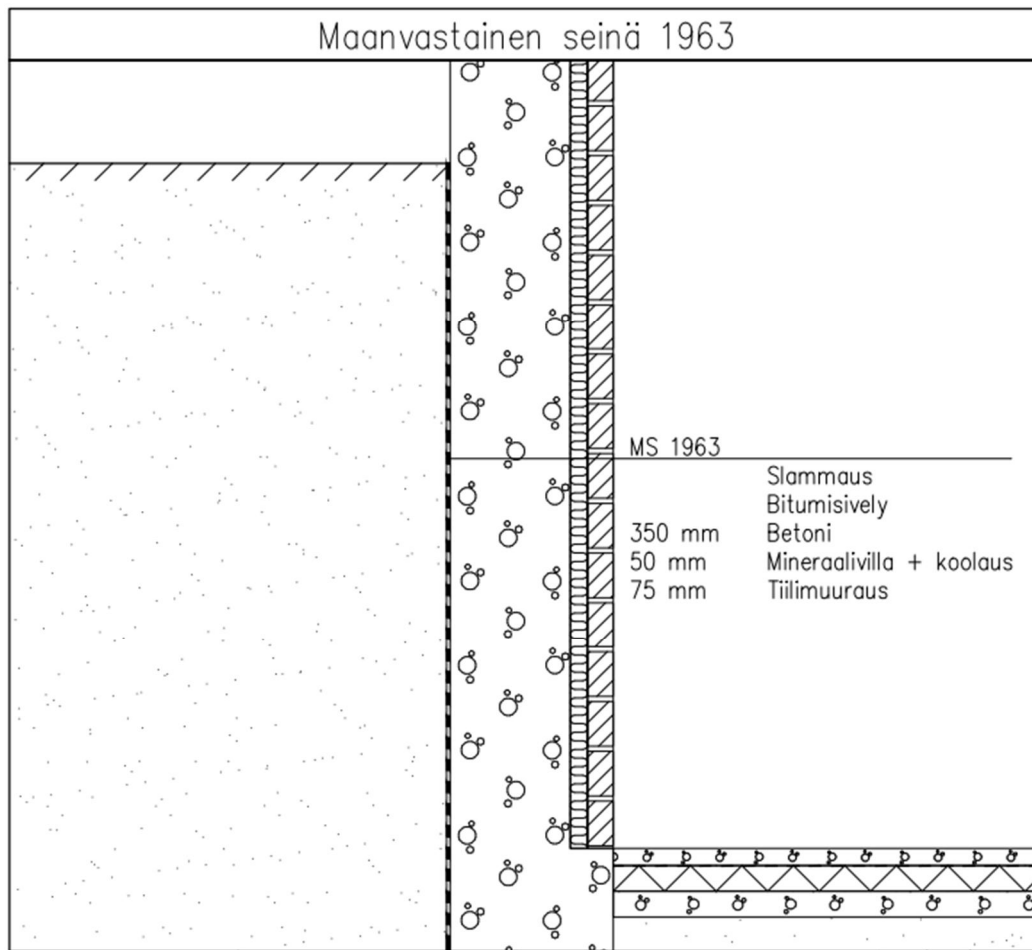
Maanvastaiset seinät ovat useimmiten betoni- tai harkkorakenteisia. Tässä tutkimuksessa tarkastelut on rajattu ainoastaan betonirakenteisiin seiniin. Rakenteiksi valittiin kolme kosteusteknisesti erilailla toimivaa seinää. Pääasiallinen ero rakenteiden välillä on veden- ja lämmöneristeen sijainti. Rakenteet valittiin Kerrostalot kirjasarjassa (Neuvonen 2006) esitetyistä rakenteista ja RT-korteista (RT 82-10438 & RT 81-10854). Valitut rakenteet nimettiin tyypillisen rakentamisajankohdan mukaan: MS 1959, MS 1963, ja MS 1990.

MS 1959 (kuva 5.1) edustaa ennen 1960-lukua rakennettua maanvastaista seinää, jossa lämmön- ja vedeneristeet on sijoitettu kantavan rakenteen sisäpuolelle. Lämmöneristeenä on 50 mm paksu lastuvillalevy ja verhomuuraus kahi- tai sahajauhoteilestä. Salaojitukset ovat usein puutteellisia tässä rakenteessa, joten alkuperäistä ja sisäpuolelta eristettyä rakennetta tarkasteltaessa salaojituserrosta ei mallinneta seinän ulkopuolelle. Näin varmistetaan, että korjausratkaisut toimivat myös kriittisimmissä olosuhteissa.



Kuva 5.1 Vuoden 1959 tyypillinen maanvastainen seinärakenne.

MS 1963 (kuva 5.2) edustaa vuoden 1960 jälkeen rakennettua maanvastaista seinää, jossa vedeneristeenä toimiva bitumisively on sijoitettu kantavan rakenteen ulkopintaan. Lämmöneriste on kuitenkin nykysuosituksista poiketen rakenteen sisäpuolella ja peittyy verhomuurauksen taakse. Myöskään tässä rakenteessa ei aina ole salaojituserrosta rakenteen ulkopuolella, joten sitä ei ole lisätty laskentamalleihin.



Kuva 5.2 1960-luvun tyypillinen maanvastainen seinärakenne.

MS 1990 (kuva 5.3) on 1990-luvulla julkaistun RT-kortin (RT 82-10438) mukaisesti toteutettu maanvastainen rakenne, jossa lämmön- ja vedeneristeet on sijoitettu oikeaoppisesti rakenteen ulkopuolelle. Kapillaarinen vedenousu on katkaistu vähintään 200 mm:n paksuisella salaojasorakerroksella. Lämmöneristeen paksuus on maan pinnasta 1 m:n syvyyteen asti 100 mm ja tätä alempana 50 mm.

Maan termisen diffusiviteetin ollessa keskimäärin $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ vähimmäispaksuudeksi saadaan vuoden vaihteluajalla 6,3 m. (Hagentoft 2001) Laskenta-ajan lyhentämiseksi maakerroksen paksuutta rakenteen ympärillä jouduttiin pienentämään 3 metriin. Kun maamassaa pienennetään, rakenteen ja ulkoilman välisen lämpötilakentän viive pienee. Tässä tapauksessa maan paksuus katsottiin riittäväksi, koska se on suurempi kuin tarkasteltavan seinän korkeus.

Tarkastelupisteet sijoitetaan malliin niin, että tarkastelupiste 1 (TP1) on seinän yläreunassa maanpinnan yläpuolisessa osassa, tarkastelupiste 2 (TP2) on seinän maanvastaisen osan puolella välissä eli noin 1,4 metrin syvyydessä maanpinnan alapuolella ja tarkastelupiste 3 (TP3) on lattian yläpinnan tasossa. Tarkastelupisteitä asetetaan kunkin materiaalikerroksen molempiin rajapintoihin. Homeindeksin laskentaan valitaan kriittisimmän rajapinnan tarkastelupisteet.

5.2 Laskentaohjelmat

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluja varten TTY:n rakennustekniikanlaitoksella on käytössä kaksi ohjelmaa Delphin 5.8 ja WUFI 2D. Ohjelmat hyödyntävät numeerisia laskentamenetelmiä, jotka perustuvat energian ja massan säilymlakeihin. Ohjelmat sisältävät kattavat materiaalikirjastot, jotka perustuvat mitattuihin materiaalitietoihin sekä kirjallisuusarvoihin. Kummassakin ohjelmassa on mahdollista simuloida yhdistettyä lämmön- ja kosteudensiirtymistä kaksiulotteisessa rakenteessa. Molemmat ovat niin sanottuja epästationäärisiä laskentaohjelmia, eli laskenta suoritetaan muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Ulkoilman olosuhteet tuodaan malliin säädatatiedostoina, joissa on mukana lämpötila, suhteellinen kosteus, sade, viistosade sekä lyhyt- ja pitkäaaltoinen säteily. WUFI 2D huomioi diffusiivisen ja kapillaarisen kosteuden siirtymisen. Delphin ottaa näiden lisäksi huomioon myös konvektiivisen kosteuden siirtymisen, joten sillä on mahdollista tarkastella myös ilmapuotojen vaikutuksia rakenteisiin.

Käyttökokemuksen perusteella WUFI 2D on aloittelijaystävällisempi, sillä siinä on paljon valmiiksi määriteltyjä parametreja, jotka nopeuttavat simulointimallin luomista. Delphinin käyttö vaatii enemmän opettelua, mutta mahdollistaa mallien paremman muokattavuuden.

Yksi merkittävä etu Delphin-ohjelman toiminnassa on, että se tallentaa jatkuvasti tuloksia laskennan edetessä. Näin ollen laskentaa on mahdollista jatkaa, mikäli se äkillisesti keskeytyy. WUFI 2D tallentaa tulokset vasta laskennan päätyttyä, eli laskenta on aloitettava alusta keskeytymistapauksessa.

Delphinissä laskentatulosteet määritetään manuaalisesti. Tulokset voidaan tallentaa halutulla aikajaolla koko laskentaverkon alueelta tai erikseen yksittäisistä tarkastelupisteistä. Tulostiedostoista saadaan huomattavasti pienempiä manuaalisesti määrittämällä.

WUFI:ssa laskentatulokset tallentuvat automaattisesti jokaisen laskentaelementin osalta. Suurissa 2D-malleissa, joissa laskentaverkko on tiheä, tulostiedostojen koko voi kasvaa hyvin suureksi.

Alustavien testien perusteella simuloinneissa päädyttiin käyttämään Delphin 5.8 ohjelmaa mallien paremman muokattavuuden ja ilmavuotojen tarkastelumahdollisuuden takia.

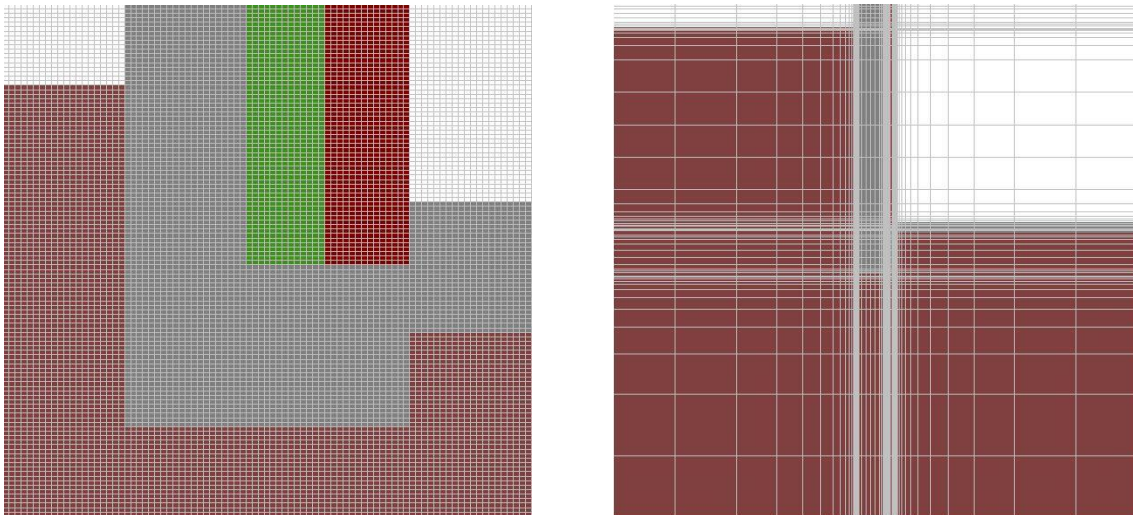
5.3 Laskenta-ajan optimointi

Simulaatioiden laskenta-aikaan vaikuttavat hyvin monet seikat, kuten materiaalikerrosten määrä, laskentaverkon tiheys, materiaalien ominaisuudet ja laskennalle asetetut reunaehdot. Aiempaa kokemusta maanvastaisten seinien simuloimisesta ei tutkimusryhmässä ollut, joten tutkimuksen alussa oli kehitettävä laskenta-ajan kannalta optimaalinen mallinnustapa.

Tutkimuksen alussa yksittäisten simulaatioiden ennustetut laskenta-ajat vaihtelivat kuukausista jopa useisiin vuosiin. Seuraavaksi esitettyjen menetelmien avulla yksittäisen tapauksen laskenta-aika saatiin lyhennettyä keskimäärin 20 tuntiin kahdessa osassa suoritettuna. Laskennat suoritettiin TCSC:n (Tampere Center of Scientific Computing) tarjoamalla Merope-laskentapalvelimella. Merope on Linux-pohjainen laskentaklusteri, joka sisältää 1500 prosessoriydintä. Tätä tutkimusta varten käytössä oli erikseen räätälöity 12 prosessoriytimen laskentanosolmu. Laskentapalvelimen avulla useita simulaatioita pystyttiin ajamaan rinnakkain, mikä nopeutti huomattavasti tulosten saantia, kun laskentatapauksia oli paljon.

5.3.1 Laskentaverkko

Delphinissä tutkittava rakenne jaetaan laskentaelementteihin, jotka yhdessä muodostavat laskentaverkon. Laskenta perustuu siihen, että jokaisen elementin alueella vallitsee vakio-olosuhteet, ja lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muuttuminen on mahdollista vain elementtien rajapinnoilla. Mitä tiheämmäksi laskentaverkko asetetaan, sitä tarkempia tuloksia saadaan, mutta myös laskenta-aika pitenee. Laskenta-ajan rajoittamiseksi laskentaverkkoa voidaan harventaa materiaalikerrosten keskiosissa, laskentatarkkuuden merkittävästi heikentymättä. Kuvassa 5.4 on esitetty periaatekuva Delphinillä luodusta laskentamallista.



Kuva 5.4 Laskentaverkon jakautuminen Delphin-mallissa.

Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy rakenne niin, että jokainen laskentaelementti on venytetty samankokoiseksi ja oikean puoleisessa kuvassa laskentaverkko on mittakaavassa. Malleissa laskentaverkko muodostettiin niin, että materiaalikerrosten rajapinnoilla pienin laskentaelementin leveys on 0,5 mm.

5.3.2 Laskenta-ajan valinta

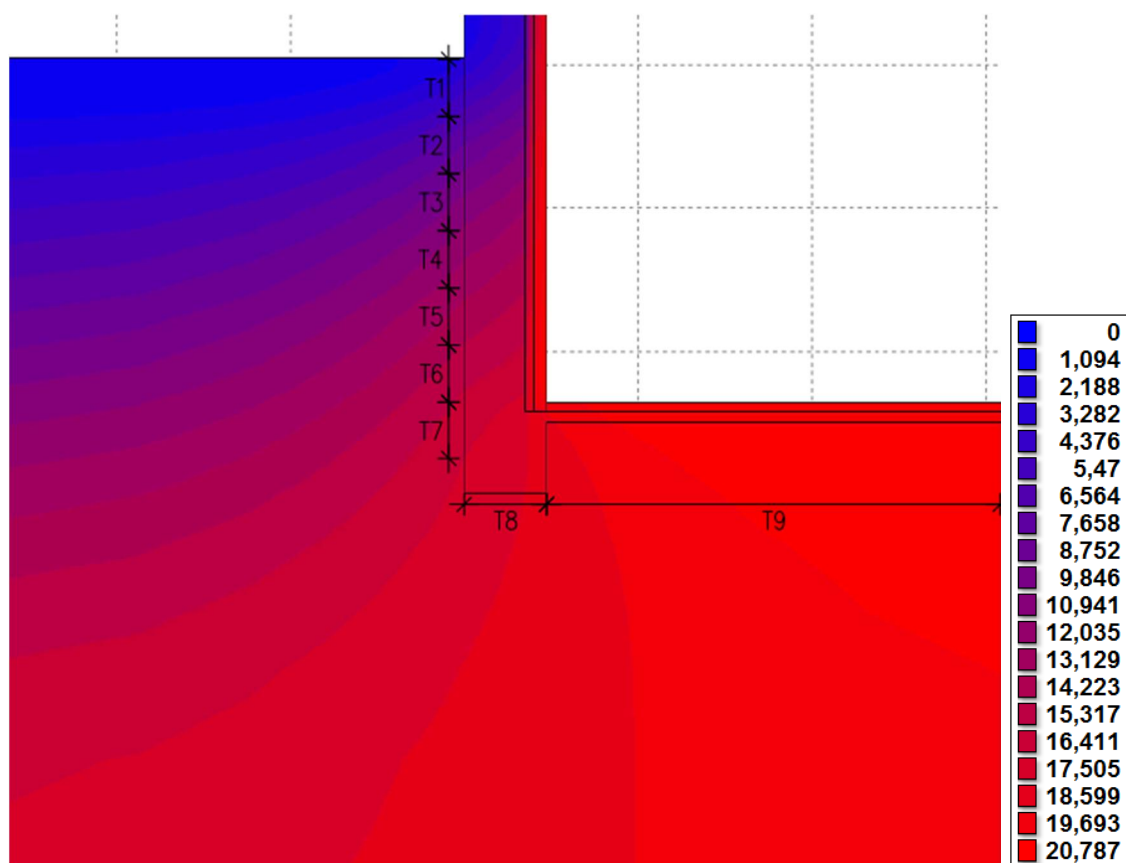
Simulaatioiden laskenta-aika on valittava niin, että lämpötila- ja kosteusolosuhteet rakenteessa ehtivät muuttua käyttötilannetta vastaaviksi ennen varsinaisen tarkastelujakson alkua. Lämpötilan osalta muutos tapahtuu hyvin nopeasti, jopa muutamassa vuorokaudessa, mutta kosteuden osalta olosuhteiden tasaantumiseen voi mennä useita vuosia alkuolosuhteista riippuen. (Vinha et al. 2013)

Hometarkastelua varten vaaditaan vuoden mittainen tarkastelujakso. Koska kosteuden tasaantuminen massiivisissa betonirakenteissa on hidasta, päädyttiin neljän vuoden tarkastelujaksoa edeltävään ajanjaksoon. Simulaatiojakson kokonaispituus oli siis 5 vuotta.

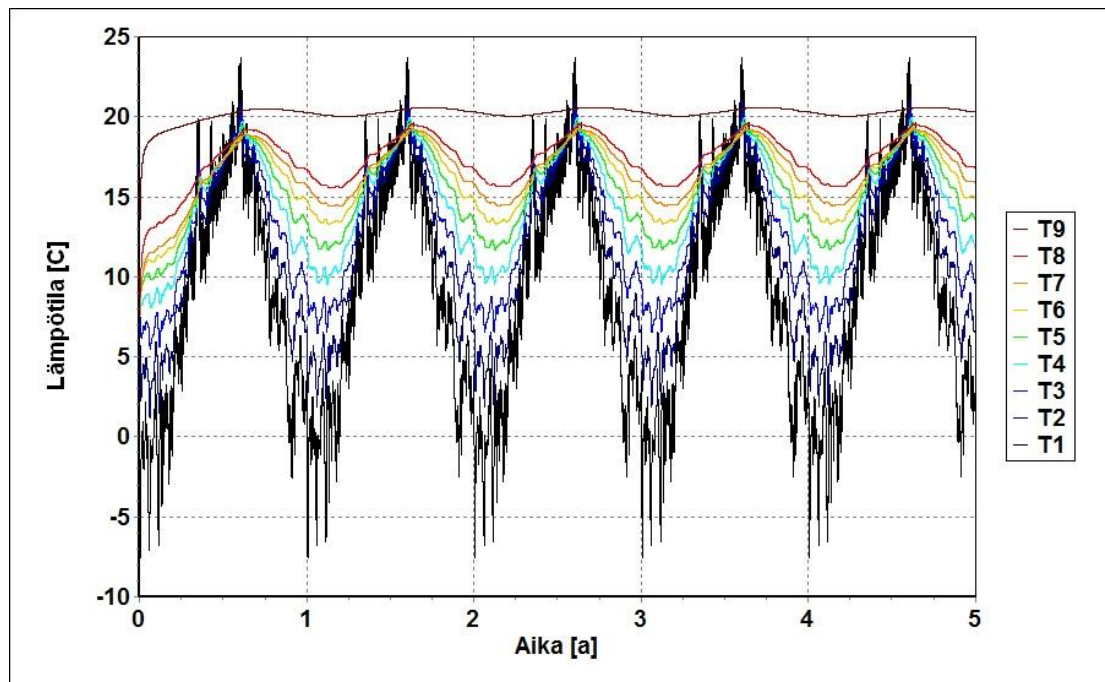
5.3.3 Maakosteus mallissa

Sekä Delphin- että WUFI 2D -ohjelmassa laskenta hidastuu huomattavasti, kun materiaalin kosteuspitoisuus ylittää kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden. Maanvastaisia rakenteita mallinnettaessa rakennetta vasten oleva maakerros on käytännössä aina 100 % RH:ssa, eli kapillaarinen kyllästyskosteus ylittyy. Tämän vuoksi maanvastaisen rakenteen yhdistetyn lämpö- ja kosteussimulaation laskenta-aika venyi liian pitkäksi tutkimusta ajatellen. Jotta laskennat saatiin suoritettua mielekkäässä ajassa, maakerros jouduttiin jättämään kokonaan pois yhdistetyistä lämpö- ja kosteustarkasteluista. Tätä varten kukin laskentatapaus jaettiin kahteen vaiheeseen.

Ensimmäisessä vaiheessa mallinnettiin seinärakenne liittymiseen 3 metrin paksuisen maakerroksen kanssa. Rakenteen lämpötilakenttä simuloitiin Jokioisen 2004 sääolosuhteissa. Seinä jaettiin laskentaverkon mukaan 9–10 noin 400 mm korkuiseen osaan. Seinän ulkopinnan lämpötilakentän muutokset ajan suhteen tallennettiin paloittain säädätiedostoiksi. Esimerkkinä lämpötilakentän paloittelusta MS 1959 -rakenteen lämpötilakenttä simulaation lopussa ja paloittelun lämpötilakentän jakoperiaate on esitetty kuvassa 5.5 ja vastaavat säädätiedostojen kuvaajat kuvassa 5.6.



Kuva 5.5 MS 1959 lämpötilakenttä simulaation lopussa ja jaotteluperiaate.



Kuva 5.6 MS 1959 säädatatiedostojen kuvaajat. Kunkin tarkastelualueen lämpötila laskettiin elementtien lämpötilojen keskiarvona.

Vaiheessa 2 mallinnettiin seinärakenne ilman ulkopuolista maakerrosta. Vaiheessa 1 saatu lämpötiladata tuotiin malliin niin, että seinän ulkopinnan lämpötilakenttä muuttuu vaiheen 1 tulosten mukaan. Maakosteuden vaikutus saatiin näin simuloitua kosteuden diffuusiona 100 % RH:ssa maassa vallitsevassa lämpötilassa.

Kutakin rakennetta ja korjausratkaisua tarkasteltaessa oli erikseen suoritettava sekä 1 että 2 vaiheen simulaatiot, sillä lämmöneristysen paksuus vaikuttaa suoraan maan lämpötilakenttään.

5.3.4 Vedeneristeen mallintaminen

Rakennetta simuloitaessa vedeneristyskerros on mahdollista mallintaa kahdella eri tavalla: erillisenä materiaalikerroksena tai kahden materiaalin välisenä pintavastuksena. Pintavastukselle asetetaan arvot vesihöyryn vastukselle sekä kapillaarisen veden vastukselle. Materiaalikerroksen ominaisuudet valitaan käytettävän materiaalin mukaan esimerkiksi materiaalikirjastosta. Delphin-ohjelmassa pintavastusta käytettäessä on hyvä huomata, että vastuksen on oltava kahden eri materiaalin välissä. Tilanteessa, jossa vedeneristeen molemmiin puolin on samaa materiaalia, voidaan ongelma kiertää monistamalla materiaali ja asettamalla se toiselle materiaalikerrokselle eri nimellä.

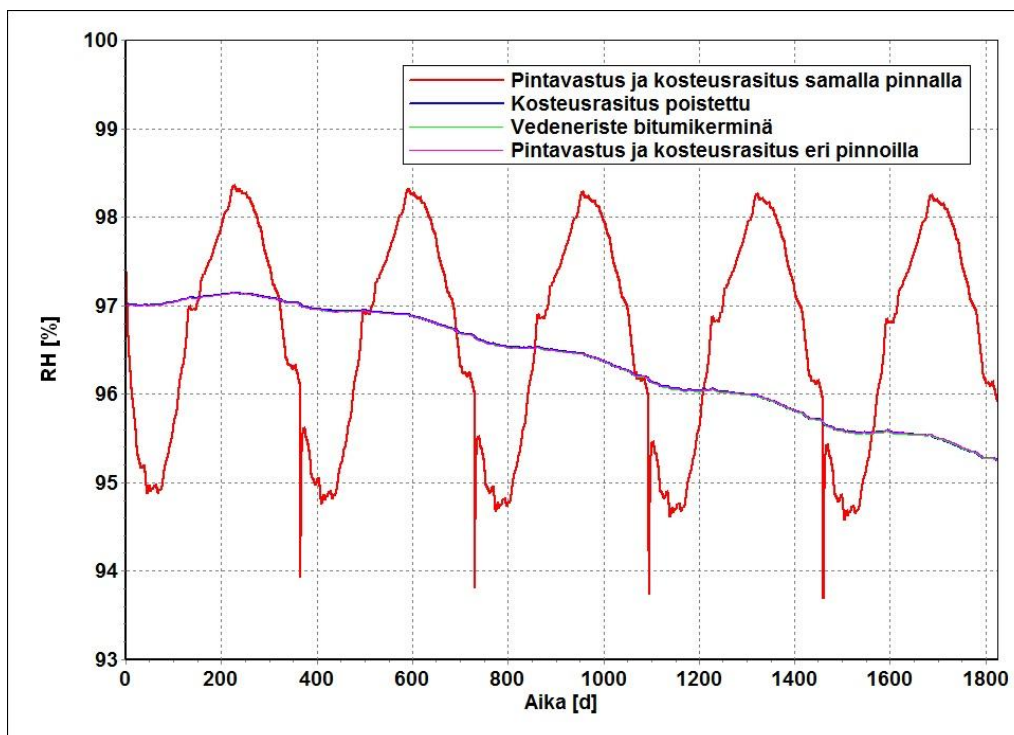
Pintavastuksena mallinnettaessa suhteelliselle diffuusiovastukselle asetettiin arvo $s_d=100$ m ja kapillaarisen veden vastukselle $5 \cdot 10^{17}$ m/s. Tapauksessa 1 bitumin m arvoksi annettiin 100000, jolloin sama suhteellinen diffuusiovastus saavutettiin 1 mm:n paksuisella materiaalikerroksella. Bitumi määritettiin vesitiiviiksi.

Vedeneristekerroksen toimintaa testattiin mallintamalla yksinkertainen yksiulotteinen rakenne, jossa betonin alapinta on vesikosketuksessa, yläpinnassa on vedeneriste, ja vedeneristeen yläpuolella toinen betonilaatta. Kummallakin tavalla mallinnettaessa alempi betonilaatta vettyi hyvin nopeasti, mutta eristyskerros ei päästänyt kosteutta lävitseen. Yksiulotteisessa tapauksessa vedeneriste toimii siis odotetusti kummallakin mallinnustavalla.

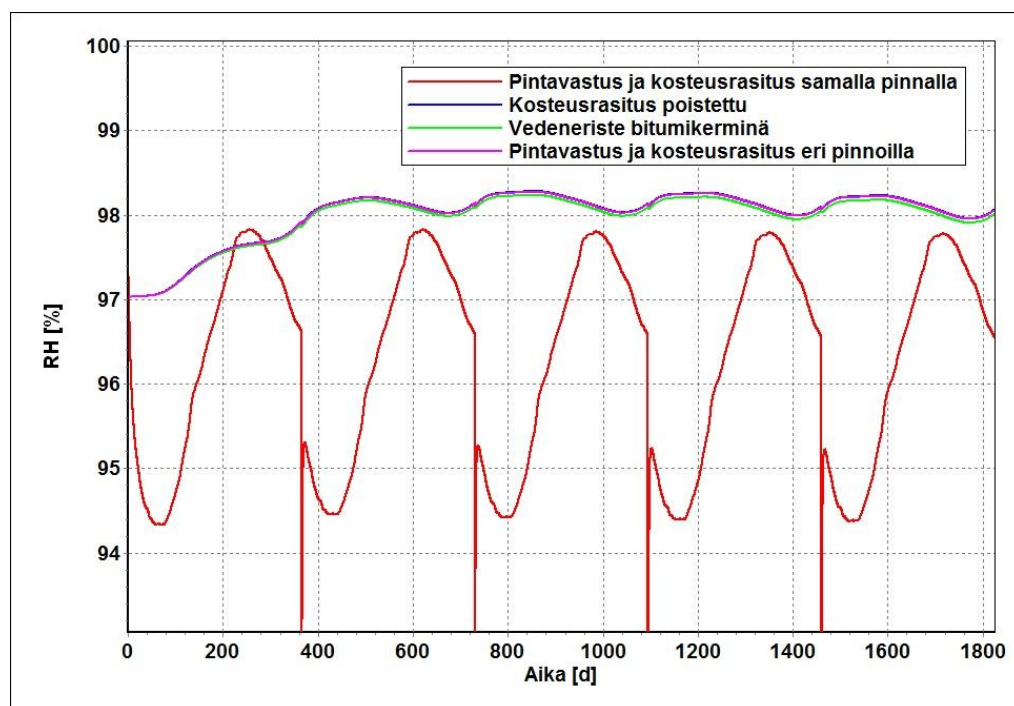
Laskentatapauksissa, joissa pintavastus asetettiin samaan pintaan kosteusrasituksen kanssa, havaittiin, että pintavastus ei estänytkaan kosteuden pääsyä betoniin. Ohjelma siis oletti virheellisesti kosteusrasituksen vedeneristeen sisäpuolelle. Laskentamallien korjaamiseksi testattiin kolmea eri ratkaisua:

1. kosteusrasitus poistettiin kokonaan vedeneristeen ulkopuolelta
2. vedeneriste mallinnettiin pintavastuksen sijaan rakennekerroksena eli 1 mm paksuisena bitumikermänä, ja kosteusrasitus asetettiin kermin ulkopuolelle
3. pintavastus asetettiin betonin ulkopintaan ja kosteusrasitus 0,5 mm maakerroksen ulkopuolelle.

Kuvassa 5.7 on esitetty suhteellisen kosteuden muutos betonin ulkopinnassa tarkastelupisteessä 2 alkuperäisellä virheellisellä mallinnustavalla sekä kolmella korjausratkaisulla. Kuvassa 5.8 on vastaava esitys tarkastelupisteestä 3. Tarkastelupistettä 1 ei tarkasteltu, koska se sijaitsee maanpinnan yläpuolisessa osassa, johon vedeneriste ei ulotu. Alkuperäisen simulaation RH käyrässä vuoden välein toistuva piikki aiheutui maan lämpötiladatan syötössä käytetystä asetuksesta, joka katkaisee säädätan ensimmäisen simulaatiovuoden lopussa ja toistaa saman datan seuraaville simulaatiovuosille. Virheellinen asetus on korjattu lopullisissa simulaatioissa.



Kuva 5.7 Vedeneristeen mallinnustavan vaikutus suhteelliseen kosteuteen betonin ulkopinnassa tarkastelupisteessä 2. Kolme vaihtoehtoista mallinnustapaa tuottavat käytännössä samat tulokset.



Kuva 5.8 Vedeneristeen mallinnustavan vaikutus suhteelliseen kosteuteen betonin ulkopinnassa tarkastelupisteessä 3. Kolme vaihtoehtoista mallinnustapaa tuottavat käytännössä samat tulokset. Yhden viivan eroaminen kolmen porukasta johtuu mahdollisesti korkeasta suhteellisesta kosteudesta ja siihen liittyvistä numeerista laskentatoleransseista.

Kuvista nähdään, että virheellisellä mallinnustavalla betonipinnan RH vaihtelee voimakkaasti ulkopuolisen kosteusrasituksen vaikutuksesta. Todellisuudessa voimakkaita kosteusvaihteluita ei pitäisi näkyä, sillä vedeneristeen toimiessa oikein betonipinnan kosteus pääsee kuivumaan vain sisälle päin muiden rakennekerrosten läpi, mikä tapahtuu hyvin hitaasti. Vedeneriste ei siis toimi oikein, kun pintavastus ja kosteusrasitus on asetettu samalle pinnalle.

Kaikilla korjausratkaisuilla mallinnettaessa betonipinnan RH tasoittuu lähes samalle käyrälle kummassakin tarkastelupisteessä. Suhteellinen kosteus pysyy jatkuvasti korkeana, mikä vaikuttaisi todenmukaiselta käyttäytymiseltä kyseiselle rakenteelle, sillä suhteellinen kosteus on aina Kelvinin lain ja tasapainokosteuskäyrän kautta sidoksissa materiaalin kosteuspitoisuuteen. Pienet suhteellisen kosteuden vaihtelut selittyvät lämpötilan vuodenaikavaihteluilla.

Korjaustapojen vertaamiseksi määritettiin myös homeindeksit tapauskohtaisesti tarkastelupisteissä 2 ja 3. Tarkastelupisteessä 2 homeindeksin arvoksi saatiin 4,6 kaikilla korjausmenettelyillä ja tarkastelupisteessä 3 vastaavasti 4,1.

Kaikki korjaustavat tuottavat lähes samat tulokset sekä betonin suhteellisen kosteuden että homeindeksin osalta, joten ulkopinnan bitumikerman virheellisen mallinnustavan korjaamiseen valittiin työmäärältään pienin ratkaisu: kosteusrasituksen poistaminen. Betoniseinän pinnassa oleva bitumikermi oletettiin tässä tapauksessa niin tiiviiksi, että ulkopuolisella kosteusrasituksella ei ole vaikutusta rakenteen toimintaan.

6. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä osiossa esitellään simulaatioiden tuloksista johdetut homeindeksin arvot sekä johtopäätökset korjausratkaisujen toimivuudesta. Kullekin rakenteelle on valittu kolme eri sisäpuolista korjausratkaisua, joita on verrattu alkuperäiseen rakenteeseen ja ulkopuolelta eristettyyn rakenteeseen.

Eristysratkaisujen tehokkuuden vertaamiseksi lasketaan rakenteiden U-arvot, joita verrataan Suomen rakentamismääräyskokoelman D3 ohjeen vertailuarvoihin. D3:n mukaan maata vasten oleville rakennusosille vertailulämpöhäviö $U = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja muille seinille $U = 0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.1 Maanvastainen seinä 1959

MS 1959 rakenteessa veden- ja lämmöneristeet on sijoitettu kantavan rakenteen sisäpuolelle. Rakenteen ongelmia ovat höyrynsulun puuttuminen ja seinän läpi tunkeutuvat kalkki ja suolat. Koska rakenteessa ei ole höyrynsulkua, sisäilman kosteus pääsee kondensoitumaan lämmöneristeen kylmälle pinnalle. Kalkki ja suolat puolestaan irrottavat vedeneristeen seinästä, mikä aiheuttaa vuotoja vedeneristeeseen ja altistaa sisäpuoliset rakennekerrokset maakosteudelle.

Rakenteen U-arvoiksi saatiin

- maanpinnan yläpuoliselle seinälle $U = 0,87 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- ja maanvastaiselle osalle $U = 0,57 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

U-arvot laskettiin RakMK C4 Lämmöneristys ohjeen 2003 mukaan. Materiaalien lämmönjohtavuuksina käytettiin RakMK C4:n normaalian lämmönjohtavuuden arvoja, jotka on ilmoitettu liitteessä C. Maanvastaisen osan U-arvo on seinän reuna- ja sisäalueen korkeuksien mukaan painotettu keskiarvo.

Rakenteen lämmöneristävyys on erittäin heikko RakMK D3:n vertailuarvoihin nähden. Korjauksen yhteydessä rakenteen U-arvo tulisi joko vähintään puolittaa tai parantaa uudisrakentamisen vertailuarvon tasolle. Tavoiteltu U-arvo MS 1959 -rakenteelle on siis $0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ maanvastaiselle osalle ja $0,43 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ maanpinnan yläpuoliselle osalle. Sisäpuoliselle lämmöneristeelle vaadittavat eristepaksuudet materiaaleittain on esitetty taulukossa 6.1.

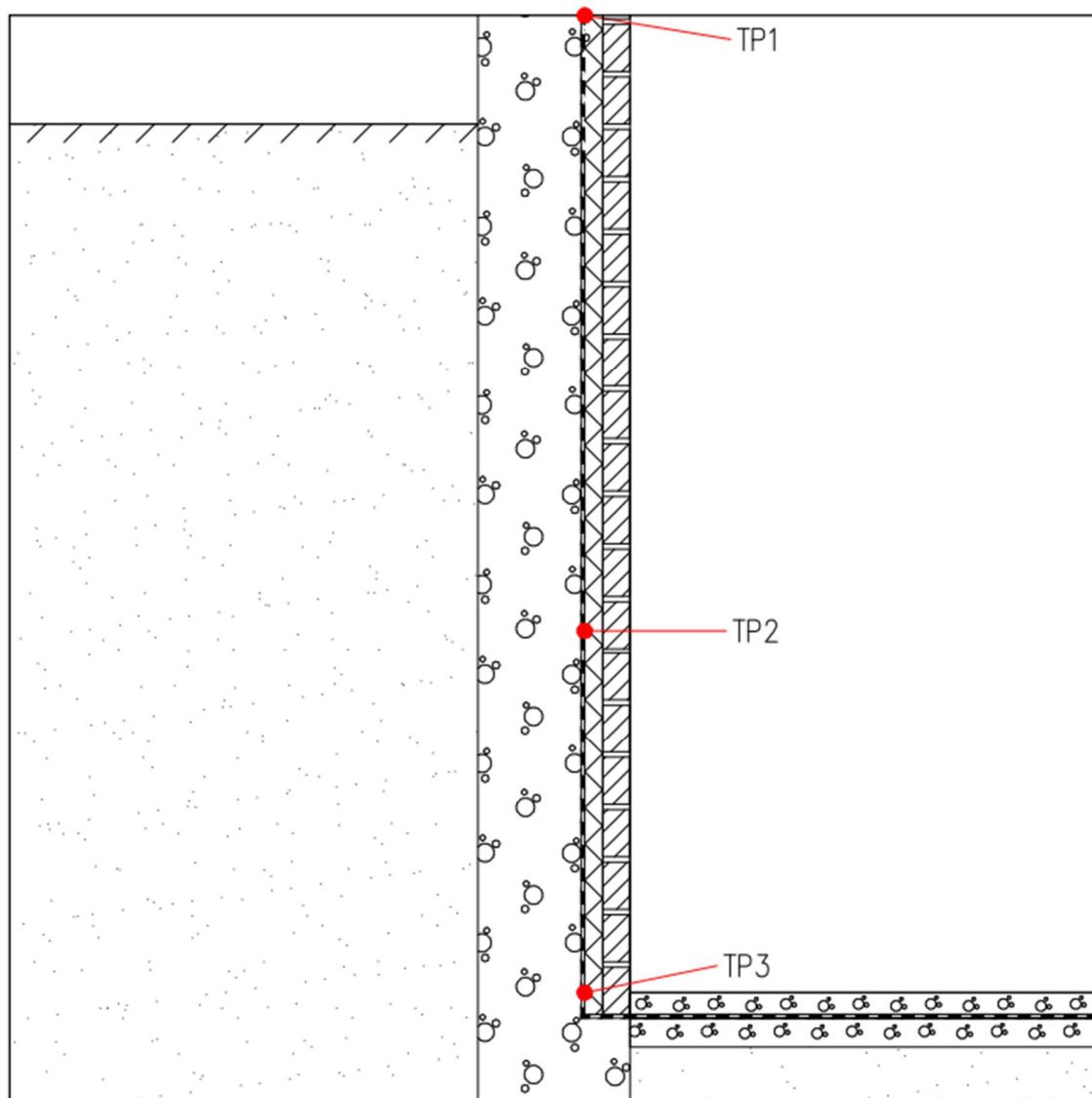
Taulukko 6.1 *Tavoiteltuun U-arvoon vaadittavat eristepaksuudet materiaaleittain sisäpuoliselle eristeelle.*

EPS	115 mm
Kalsiumsilikaattilevy	180 mm
Kevytbetoni	260 mm

Sisäpuolisissa lämmöneristystapauksissa vanha tiilimuuraus, lastuvillasementtilevyt ja vedeneristys puretaan pois uusien eristeiden tieltä. Purettavien rakenteiden paksuus on yhteensä 125 mm eli kalsiumsilikaatilla ja kevytbetonilla eristettäessä rakenteen paksuutta on kasvatettava, jotta lämmöneristysvaatimukset täyttyvät. Kalsiumsilikaatin ja kevytbetonin tapauksessa ohutta (50 mm) eristepaksuutta käytettäessä korjatun rakenteen lämmöneristävyys jää alkuperäistä heikommaksi. Siitä huolimatta simulaatioihin ja hometarkasteluihin otettiin vertailun vuoksi mukaan myös 50 mm eristyspaksuus.

Kuvassa 6.1 on esitetty alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteiden sijainnit. MS 1959 -rakenteelle tarkasteltiin simuloimalla alkuperäisen rakenteen lisäksi 5 eri korjausvaihtoehtoa:

1. eristämätön rakenne, vanhat sisäpuoliset veden- ja lämmöneristeen poistettu
2. ulkopuolinen solumuovieristys, 100 mm eriste vain maanpinnan alapuolelle, maanpinnan yläpuolelle ulottuvana sekä ilman sisäpuolisia eristysrakenteita
3. sisäpuolinen solumuovieristys, 50 mm ja 100 mm eristepaksuuksilla
4. sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys 50 mm, 100 mm ja 200 mm eristyspaksuuksilla 2 eristetyyppiä
5. sisäpuolinen kevytbetonieristys, 50 mm ja 100 mm eristyspaksuuksilla



Kuva 6.1 MS 1959 alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteet.

6.1.1 Homeindeksit

Taulukossa 6.2 on esitetty hometarkastelun tulokset MS 1959 -rakenteen osalta. Homeindeksi on laskettu kussakin rakenteessa kriittisimmässä rajapinnassa eli sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa, tai niissä tapauksissa, joissa sisäpuolista eristystä ei ole, betonin sisäpinnassa. Lyhenne up tarkoittaa ulkopuolista lämmöneristystä ja sp viittaa sisäpuoliseen eristykseen. Lyhenne mpy tarkoittaa, että ulkopuolinen eriste ulotetaan myös maanpinnan yläpuoliseen seinän osaan.

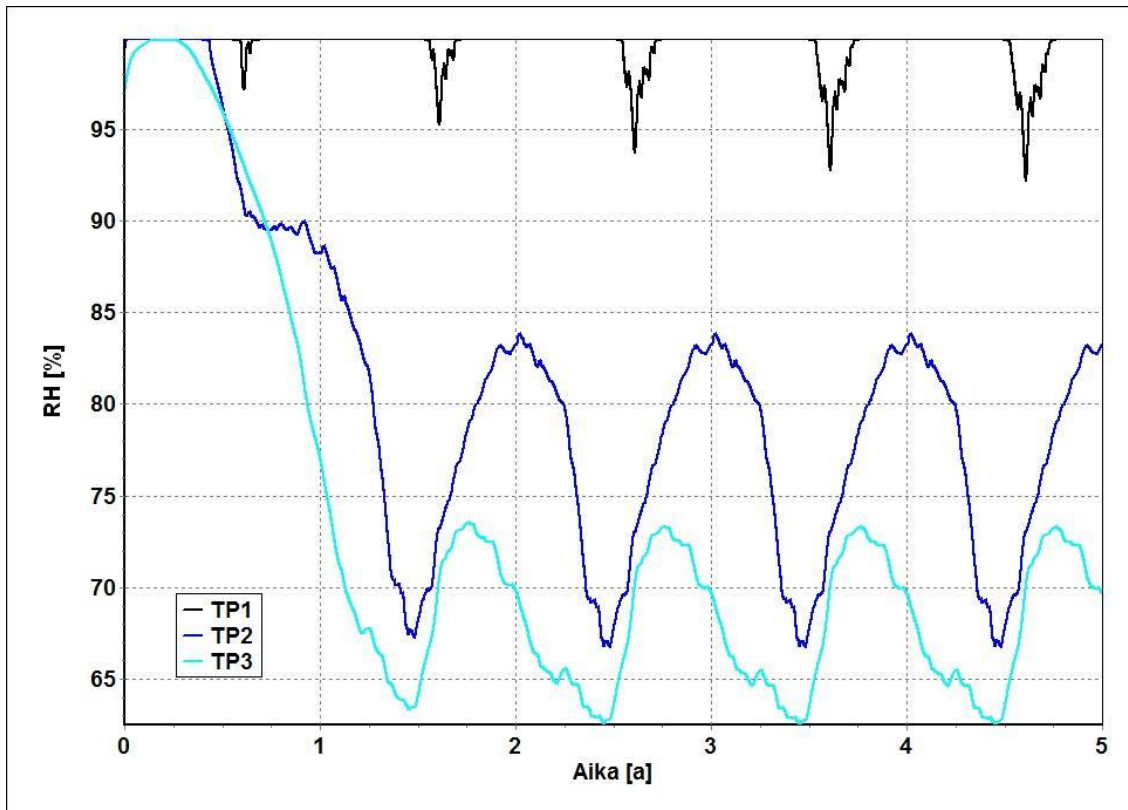
Taulukko 6.2 MS 1959 homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteittäin eri korjausvaihtoehdoilla.

Rakenne	Materiaalit rajapinnassa	HHL	Tarkastelupiste		
			1	2	3
lähtötilanne	bitumi + lastuvilla	2	5.28	0.26	0.00
eristämätön	betoni + sisäilma	3	0.01	0.00	0.01
up EPS 100mm	bitumi + lastuvilla	2	5.28	0.00	0.00
up + mpy EPS 100mm	bitumi + lastuvilla	2	0.00	0.00	0.00
up EPS 100mm, sp purettu	betoni + sisäilma	3	0.01	0.00	0.01
up + mpy EPS 100mm, sp purettu	betoni + sisäilma	3	0.00	0.00	0.01
sp EPS 50mm	betoni + EPS	3	2.24	2.77	3.41
sp EPS 100mm	betoni + EPS	3	1.99	2.97	3.41
sp CaSi1 50mm	betoni + CaSi	3	0.30	0.00	2.82
sp CaSi1 100mm	betoni + CaSi	3	0.65	0.05	2.95
sp CaSi1 200mm	betoni + CaSi	3	1.22	0.95	3.00
sp CaSi2 50mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.31
sp CaSi2 100mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	1.55
sp CaSi2 200mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	2.42
sp kevytbetoni 50mm	betoni + k.bet	2/3	0.99	0.00	3.36
sp kevytbetoni 100mm	betoni + k.bet	2/3	1.60	0.13	3.45

Rakenne voidaan määritellä toimivaksi, jos homeindeksin arvot ovat alle yhden kaikissa tarkastelupisteissä. Taulukossa raja-arvon 1 ylittävät homeindeksin arvot on korostettu punaisella.

6.1.2 Lähtötilanne

Alkuperäisessä rakenteessa homeindeksi nousee hyvin korkeaksi seinän maanpinnan yläpuolisessa osassa (TP1), mutta pysyy alhaisena maanpinnan alapuolella. Tilanteen havainnollistamiseksi kuvaan 6.2 on koottu suhteellisen kosteuden vaihtelut lämmöneristeen ulkopinnassa tarkastelupisteittäin.

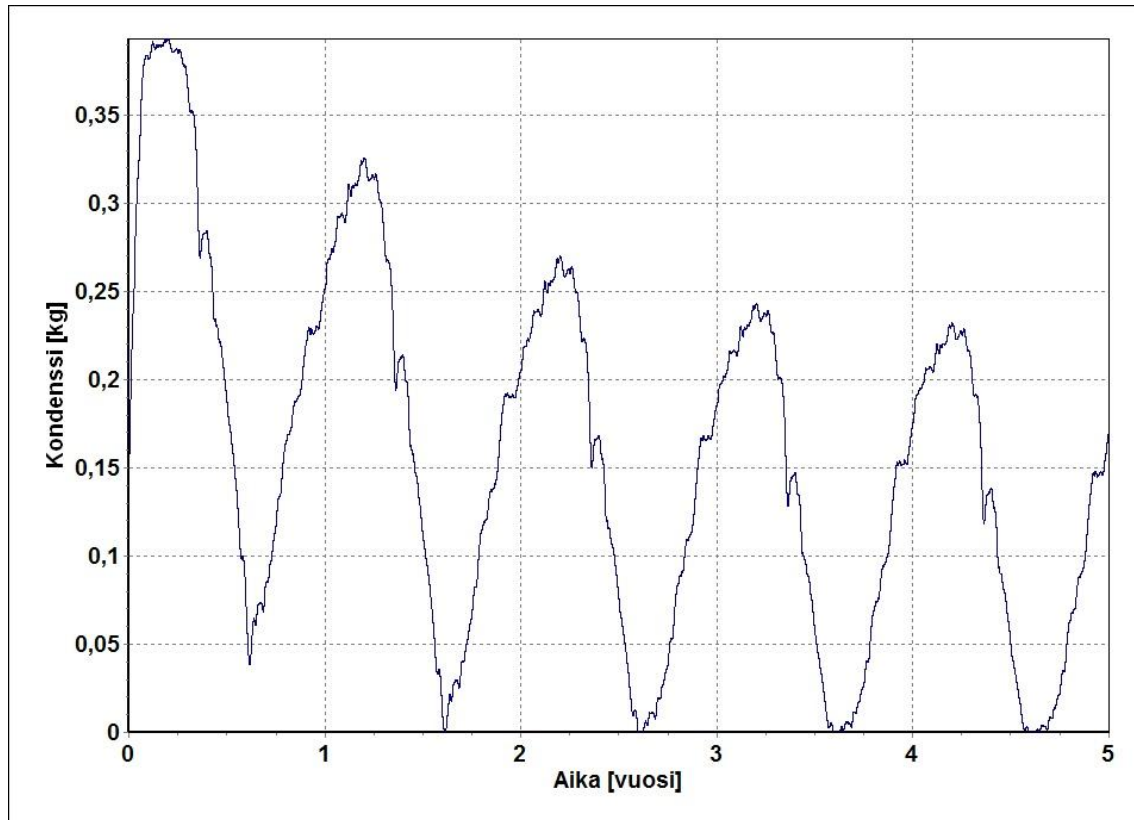


Kuva 6.2 MS 1959: suhteellisen kosteuden vaihtelu lämmöneristeen ulkopinnassa lähtötilanteessa. Korkeimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP1.

Kuvasta 6.2 nähdään, että tarkastelupisteessä 1 suhteellinen kosteus pysyy jatkuvasti korkeana: yli 90 % RH. Lämmöneriste sijaitsee vedeneristeen sisäpuolella, joten maakosteudella ei ole vaikutusta eristeen kastumiseen. Höyrynsulun puuttuessa sisäilman kosteus pääsee tiivistymään lämmöneristeeseen. Merkittävin kosteuden lähde on siis sisäilmasta diffuusiolla tuleva kosteus. Maanvastaisissa osissa perusmaa tasoittaa heikosti eristetyin rakenteen lämpötilaeroja, joten sisäpuolelta tuleva kosteusrasitus ei aiheuta kondenssia tarkastelupisteissä TP2 ja TP3.

Simulaatioiden perusteella seinän maanvastaisessa osassa ei ole homeriskiä vedeneristeen toimiessa oikein. Tarkastelupisteessä TP1 suhteellinen kosteus on suurimman osan vuodesta 100 %:n RH:ssa, joten kosteutta tiivistyy eristeeseen. Delphin ei kuitenkaan huomio vapaan veden painovoimaista siirtymistä materiaalissa, mikä tässä tapauksessa voi nostaa kosteuspitoisuutta myös lämmöneristeen alaosassa. Delphin olettaa kaikki materiaalit homogeenisiksi tasahuukoiksi massoiksi, joissa kosteuden siirtyminen huokosten välillä tapahtuu joko kapillaarisesti tai diffuusiolla. Avohuukosissa kuitumaisissa materiaaleissa, kuten mineraalivilla tai lastuvilla, materiaali ei kykene sitomaan siihen kondensoituvaa vettä, joten vapaa vesi valuu painovoiman vaikutuksesta alas-päin.

Simulaatiosta saatiin tulostettua kondensoituvan kosteuden määrä eristetilan maanpäällisen osan pinta-alan yli integroituna. Kuvan 6.3 käyrä kuvaa seinän eristetilaan kondensoituneen veden määrää seinän yläosassa 0,3 m korkuisella alueella 1 m seinän matkalla.



Kuva 6.3 Seinän maanpinnan yläpuolisen osan eristetilaan kondensoituneen veden määrä.

Kun tarkastellaan kondenssin määrää viimeisen vuoden ajalla, vettä kertyy eristetilaan pahimmillaan noin 0,23 kg. Eristetila on 50 mm paksu ja tarkasteltu alue on 0,3 m korkea ja 1m leveä. Jos kertyneen vesimäärän jakaa tasaisesti seinän alalle, muodostaa se 0,83 mm paksun vesipatjan. Kondenssin määrä on siis verrattain pieni, mutta pisaroiden muodostumista voi tapahtua.

Vedeneristeen irtoaminen betonin pinnasta kalkin ja suolojen vaikutuksesta lisää myös vuotoriskiä ja kosteusvaurion mahdollisuutta seinän alaosassa. Todellisuudessa suhteellinen kosteus rakenteen alaosassa on siis luultavasti simuloitua korkeampi, joten homeenkasvu on mahdollista myös seinän maanvastaisissa osissa, joissa lämpötila pysyy jatkuvasti korkeana. MS 1959:ää voidaan pitää siis erittäin riskialttiina rakenteena, ja rakenteen korjauksessa kaikki betoniseinän sisäpuoliset eristysrakenteet on syytä purkaa.

6.1.3 Korjausvaihtoehto 1: eristämätön rakenne

Ensimmäisenä korjausvaihtoehtona kokeiltiin täysin eristämätöntä rakennetta, josta on purettu sisäpuoliset lämmön- ja kosteudeneristyskerrokset. Tarkastelupisteet sijoitettiin betoniseinän sisäpintaan. Kun eristeet poistetaan, maanvastaisen seinän U-arvo nousee $1,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin ja maanpinnan yläpuolisen seinän $2,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin. Korjausvaihtoehtona on siis erittäin heikko lämmöneristävyys. Simuloinnissa lämpötila seinän yläosassa laski talvella alimmillaan 7°C :seen, mikä voi aiheuttaa vedon tunnetta seinän läheisyydessä.

Homeindeksi ei vuoden tarkastelujaksolla ylittänyt raja-arvoa missään tarkastelupisteistä (ks. taulukko 6.2). Paksu betoniseinä siis kuivuu sisäänpäin riittävän tehokkaasti, ettei homeita muodostu seinän sisäpinnalle. Seinän ulkopinta on kuitenkin jatkuvasti maan kosteudessa eli homeenkasvu siellä on hyvin todennäköistä. Mahdollisten vuotokohtien kautta homeitiöt ja mikrobit voivat päästä sisäilmaan ja aiheuttaa terveyshaittoja. Eristämätön rakenne ei siis sovellu lämpimien tilojen rakenteeksi.

6.1.4 Korjausvaihtoehto 2: ulkopuolinen solumuovieristys

Toinen korjausvaihtoehto on ulkopuolinen eristys solumuovieristeellä, mikä on tällä hetkellä yleisin maanvastaisten seinien korjausratkaisu. Tässä korjausratkaisussa seinän ulkopintaan asennetaan vedeneristeeksi bitumikermi, jonka ulkopuolelle tulee solumuovilämmöneristys ja salaojitus.

Kahdessa ensimmäisessä laskentatapauksessa sisäpuoliset eristeet jätettiin paikoilleen. Alkuperäinen rakenne todettiin kosteusteknisesti toimimattomaksi (taulukko 6.2), joten vanhoja eristeitä ei voida jättää paikoilleen. Vanhojen sisäpuolisten rakenteiden uusimisen mahdollisuus kuitenkin tutkittiin ulkopuolisen korjauksen yhteydessä. Laskennassa käytettiin 100 mm paksua EPS-eristettä, joka parantaa rakenteen U-arvon maanvastaiselle seinän osalle $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin ja maanpinnan yläpuoliselle osalle $0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin, kun eriste ulotetaan myös seinän yläosaan ja sisäpuolella on alkuperäisen mukaiset rakennekerrokset. Rakenne simuloitiin erikseen niin, että vain maanvastainen osa eristetään sekä siten, että ulkopuolinen eristys ulottuu myös maan pinnan yläpuolelle. Rakenteessa, jossa maanpinnan yläpuolista osaa ei eristetty, homeindeksi nousi korkeaksi seinän yläosassa (TP1). Kun eriste ulotettiin seinän yläreunaan saakka, homeindeksi pysyi nollassa. Ulkopuolisen eristyksen tapauksessa on siis tärkeää, että lämmöneriste ulotetaan koko seinän alueelle niin, ettei kylmäsiltoja synny. Kuten lähtötilanteessa sisäpuolinen vedeneriste estää ulkopuolelta tulevan kosteuden pääsyn lämmöneristekerrokseen, joten eriste pysyy kuivana eikä homeen kasvua tapahdu. Korjatussa rakenteessa ulkopuolinen vedeneristys estää kosteuden pääsyn betoniin, joten kalkki ja suolat eivät enää pääse irrottamaan seinän sisäpinnassa olevaa vedeneristystä. Betoni seinä jää tässä tapauksessa kuitenkin kahden tiiviin kerroksen väliin, joten rakenne on hyvin riskialtis esimerkiksi perustusten kautta imeytyvän kosteuden takia. Vaikka ho-

metarkastelun perusteella rakenne vaikuttaa toimivalta, ei sitä voida pitää suositeltavana.

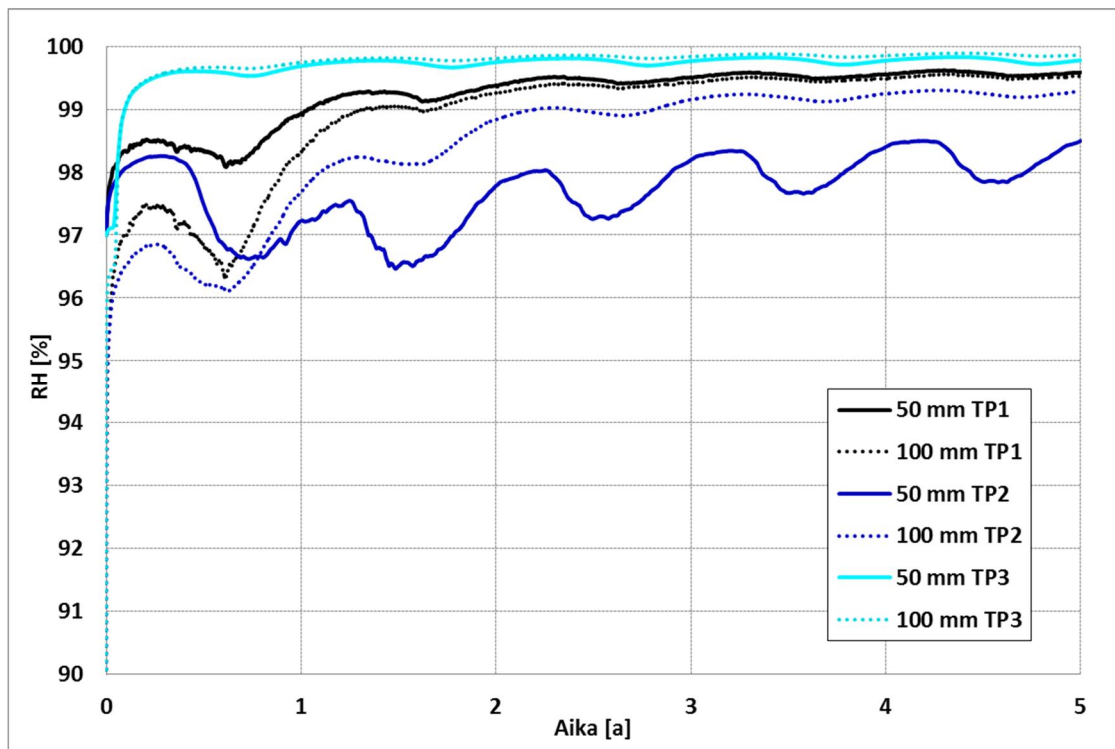
Ulkopuolisesta eristysratkaisusta laskettiin myös kaksi tapausta, joissa vanhat sisäpuoliset rakenteet poistettiin. Tällöin 100 mm EPS-eristeellä saavutetaan maanvastaisessa seinässä U-arvo $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja maanpinnan yläpuolella $0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kun eriste ulotetaan myös seinän yläosaan. Seinän yläosan eristämättä jättäminen aiheuttaa voimakkaan kylmäsilan seinän yläosaan ja lämpötila seinän sisäpinnalla laskee jopa $7,5^\circ\text{C}$:seen. Kummassakin tapauksessa betoniseinän sisäpinta pysyi homeettomana kaikissa tarkastelupisteissä eli korjausratkaisu toimii, kuten oletettiin.

Ulkopuolisen korjauksen yhteydessä sisäpuoliset rakenteet on purettava. Toimiva rakenne edellyttää, että lämmöneriste jatkuu yhtenäisenä seinän yläosaan saakka ja että lämmöneristeen alla on yhtenäinen vedeneriste. Ulkopuolinen eristysratkaisu ei sovellu kohteisiin, joissa julkisivun muutoksia ei sallita.

6.1.5 Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen solumuovieristys

Sisäpuoliseksi eristeeksi kokeiltiin 50 mm ja 100 mm paksua EPS-eristettä. Korjausratkaisussa kantavan seinän vanhat sisäpuoliset veden- ja lämmöneristeet poistetaan ja betonin sisäpintaan asennetaan solumuovieriste. Rakenne jää tällöin vedeneristämättömäksi ja maakosteus pääsee vapaasti imeytymään betoniin. Sisäpuolinen eriste voidaan ulottaa koko seinän alueelle, joten seinän yläosaan ei jää huonosti eristettyä aluetta. 100 mm:n eristyspaksuudella rakenteen U-arvoksi saadaan maanvastaiselle seinälle $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja maanpinnan yläpuoliselle seinälle $0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Suhteellisen kosteuden kuvaajasta (kuva 6.4) nähdään, että RH nousee hyvin korkeaksi kaikissa tarkastelupisteissä lämmöneristeen ulkopinnassa sekä 50 mm:n että 100 mm:n eristeellä. Tarkastelupisteissä TP2 ja TP3 suhteellinen kosteus nousee, kun lämmöneristeen paksuutta kasvatetaan. Tarkastelupisteessä TP1 suhteellinen kosteus jää kuitenkin hieman alhaisemmaksi 100 mm eristeellä, sillä paksumpi solumuovieriste hidastaa diffusiivista kosteuden siirtymistä sisäilmasta rakenteeseen.



Kuva 6.4 MS 1959: suhteellinen kosteus tarkastelupisteittäin lämmöneristeen ulkopinnassa 50 mm ja 100 mm paksulla sisäpuolisella EPS-eristeellä.

Kummallakin eristepaksuudella homeindeksi nousee kaikissa tarkastelupisteissä korkeaksi. Maanpinnan yläpuolisessa osassa seinän ulkopinta altistuu säärasitukselle, mikä kastelee seinää. EPS ei ole vesihöyrytiivistä, joten sen läpi pääsee kylminä vuodenaikoina kosteutta myös sisäpuolelta. Seinän alaosassa kosteus nousee betoniin kapillaarisesti anturan kautta. EPS:n diffuusiovastus on liian suuri, jotta betoniin kertynyt kosteus pääsisi riittävästi kuivumaan. Eristeen ulkopinta on siis jatkuvasti märkä, mikä altistaa rakenteen home- ja mikrobivaurioille.

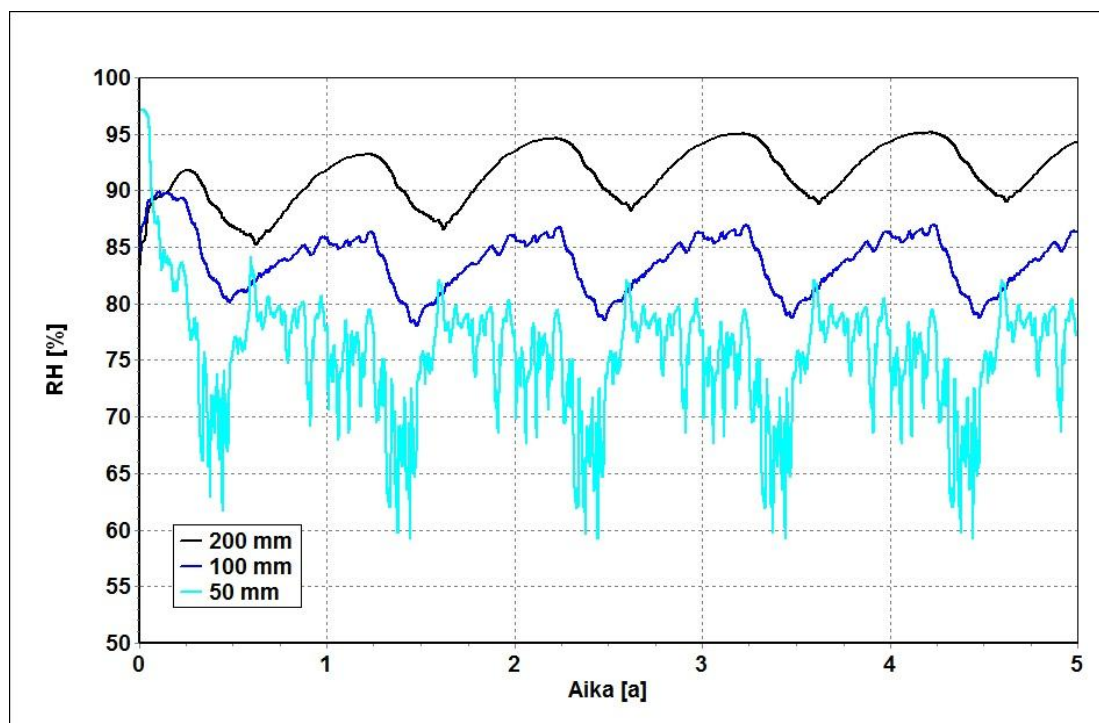
Simulaatioiden perusteella EPS-eriste ei sovellu MS 1959 -tyyppisten vedeneristämättömien rakenteiden sisäpuoliseen lämmöneristämiseen. Samaa voidaan olettaa myös tiiviimmille solumuovieristeille, kuten XPS ja polyuretaani, joita käytettäessä rakenteen kuivuminen olisi vieläkin hitaampaa.

6.1.6 Korjausvaihtoehto 4: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys

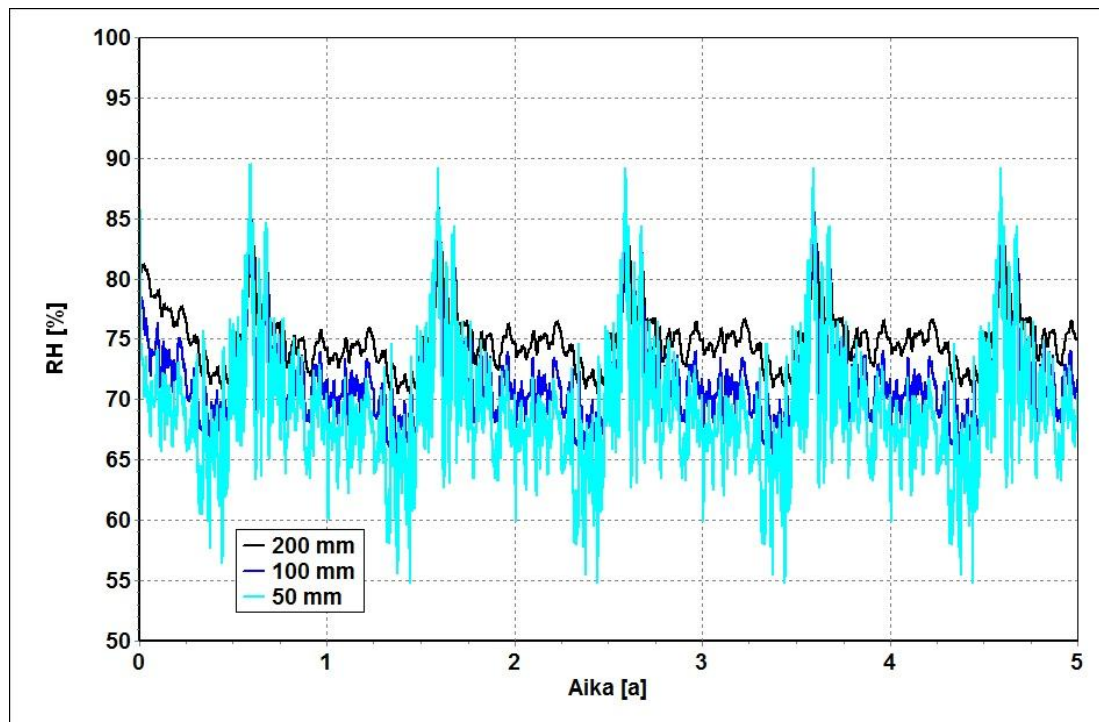
Seinän sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi kokeiltiin kahta erityyppistä kalsiumsilikaattieristettä: CaSi 1 ja CaSi 2. Eristepaksuuden vaikutusta verrattiin simuloimalla erikseen tapaukset 50 mm:n, 100 mm:n ja 200 mm:n paksuisilla levyillä. Tässä eristysratkaisussa vanhat eristysrakenteet puretaan pois ja tilalle asennetaan kalsiumsilikaattilevyt. Korjatussa rakenteessa ei ole vedeneristettä. 100 mm:n eristeellä päästään maanvas-

taisessa seinässä U-arvoon $0,41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja maanpinnan yläpuolisessa osassa $0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin.

CaSi 1 -eristeen diffuusiovastuskerroin $\mu = 5,38$ ja vedenimeytymiskerroin $A_w = 0,66 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$ kun taas CaSi 2 -eristeelle $\mu = 3,85$ ja $A_w = 1,11 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$. CaSi 2 siis läpäisee paremmin kosteutta sekä diffusiivisesti että kapillaarisesti. Eristeiden eroja havainnollistaa seuraavat suhteellisen kosteuden kuvaajat. Kuvassa 6.5 on esitetty RH CaSi 1 -levyllä eristetyssä rakenteessa tarkastelupisteessä 2 lämmöneristeen takana eri eristyspaksuuksilla ja kuvassa 6.6 vastaavat kuvaajat CaSi 2 -eristeellä. Käyriä vertailemalla huomataan, että CaSi 1-eriste tasoittaa RH:n vaihteluita sitä enemmän, mitä paksumpi eriste on kyseessä. CaSi 2 -eristeellä RH eristeen takana myötäilee sisätilan RH:n vaihteluita eristepaksuudesta huolimatta. CaSi 2 luovuttaa siis kosteutta lävitseen selvästi nopeammin.



Kuva 6.5 MS 1959: suhteellinen kosteus TP2:ssa lämmöneristeen ulkopinnalla eri eristyspaksuuksilla CaSi 1 -eristeellä.



Kuva 6.6 MS 1959: suhteellinen kosteus TP2:ssa lämmöneristeen ulkopinnalla eri eristyspaksuuksilla CaSi 2 -eristeellä.

Homeindeksitarkastelut antavat samansuuntaisia tuloksia. Taulukosta 6.2 nähdään, että CaSi 1 -eristeellä homeindeksi kasvaa, kun eristepaksuutta kasvatetaan. Tarkastelupisteessä TP3 homeindeksi nousee korkeaksi kaikilla eristyspaksuuksilla. CaSi 1:n kosteudenluovutuskyky ei siis riitä kuivattamaan maasta imeytyvää kosteutta. Tarkastelupisteissä TP1 ja TP2 homeindeksi pysyy sallituissa rajoissa 100 mm eristyspaksuuteen asti, joten ongelma saattaisi korjaantua asentamalla kapillaarikatko seinän ja anturan väliin. Kyseistä rakennetta ei ole tarkasteltu tässä tutkimuksessa, joten kosteusteknisen toimivuuden varmistaminen vaatii jatkotutkimuksia.

CaSi 2 -eristettä käytettäessä eristelevy luovuttaa kosteutta tehokkaasti. 50 mm:n eristeellä seinä pysyy kuivana kaikissa tarkastelupisteissä (taulukko 6.2) eikä anturan kautta nousevasta maakosteudesta ole haittaa rakenteen toiminnalle. Yli 50 mm:n eristyspaksuuksilla homeindeksi kuitenkin nousee korkeaksi TP3:ssa, joten suurempien eristyspaksuuksien käyttöä ei suositella.

Simulaatioiden perusteella MS 1959 -tyyppisiä vedeneristämättömiä maanvastaisia betoniseiniä voidaan lisäeristää sisäpuolelta korkeintaan 50 mm paksulla kalsiumsilikaatieristeellä. On kuitenkin tärkeää varmistaa materiaalin soveltuvuus korjaukseen. Eristeeksi tulee valita levy, jolla on suuri kapillariteettikerroin ja pieni diffuusiovastus.

6.1.7 Korjausvaihtoehto 5: sisäpuolinen kevytbetonieristys

Kevytbetonilla eristettäessä vanhat veden- ja lämmöneristeet puretaan pois ja tilalle asennetaan uusi eristys kevytbetoniharkoista tai -laatoista muuraamalla. Kevytbetonieristystä testattiin 50 ja 100 mm:n eristyspaksuuksilla.

Kevytbetonin lämmönjohtavuus on tyypillisiä lämmöneristysmateriaaleja korkeampi ($\lambda \approx 0,1 \text{ W/(mK)}$), joten U-arvon puolittamiseksi tarvitaan vähintään 260 mm:n eristepaksuus. 100 mm:n eristeellä päästään maanvastaisessa seinässä U-arvoon $0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja maanpinnan yläpuolisessa osassa $0,73 \text{ W/(m}^2\text{K)}$:n.

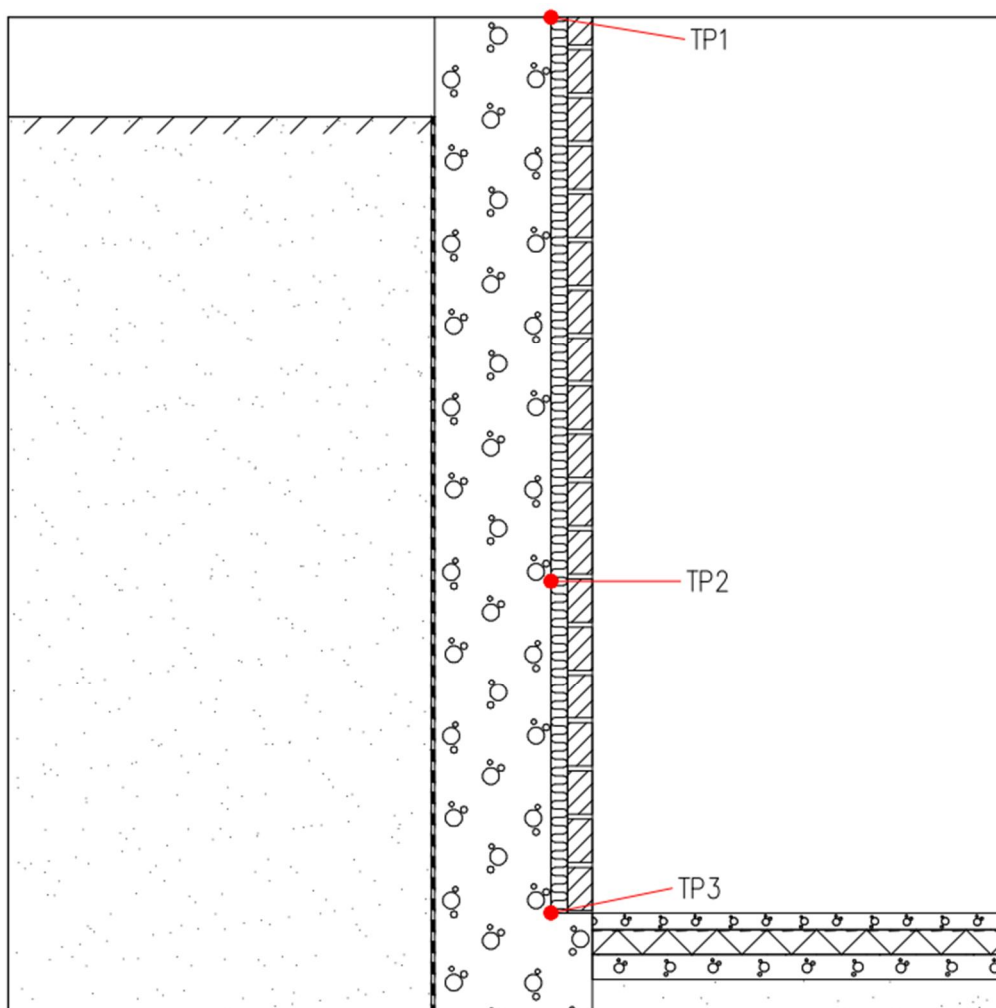
Taulukon 6.2 homeindeksejä tarkasteltaessa huomataan, että homeindeksi ylittää sallitun rajan kummallakin eristyspaksuudella sekä tarkastelupisteessä TP1 että TP3. MS 1959 -tyyppisessä vedeneristämättömässä rakenteessa sisäpuolisena lämmöneristeinä käytettävä kevytbetoni ei täytä rakenteen kosteustekniselle toiminnalle asetettuja vaatimuksia.

6.2 Maanvastainen seinä 1963

MS 1963 on ulkopuolelta vedeneristetty ja sisäpuolelta lämmöneristetty maanvastainen seinä. Kuvassa 6.7 on esitetty alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteiden sijainnit. Lämmöneriste on asennettu suoraan kosteaa betonia vasten, joten homevaurion riski on suuri. Jos perustusten alla ei ole toimivaa kapillaarikatkoa, anturan kautta kapillaarisesti seinään nouseva kosteus voi myös aiheuttaa ongelmia.

MS 1963 rakenteelle tarkasteltiin simuloimalla alkuperäisen rakenteen lisäksi 5 eri korjausvaihtoehtoa:

- | | |
|--|--|
| 1. eristämätön rakenne, | vanhat sisäpuoliset lämmöneristeet poistettu |
| 2. ulkopuolinen solumuovieristys, | 100 mm eriste vain maanpinnan alapuolelle, maanpinnan yläpuolelle ulottuvana sekä ilman sisäpuolisia eristysrakenteita |
| 3. sisäpuolinen solumuovieristys, | EPS 50 mm ja 100 mm eristepaksuuksilla sekä XPS 100mm eristepaksuudella |
| 4. sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys | 2 eristetyyppiä 50 mm, 100 mm ja 200 mm eristyspaksuuksilla |
| 5. sisäpuolinen kevytbetonieristys, | 50 mm ja 100 mm eristyspaksuuksilla. |



Kuva 6.7 MS 1963 alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteiden sijainnit.

Rakenteen U-arvoiksi saatiin

- maanpinnan yläpuoliselle seinälle $U = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- ja maanvastaiselle osalle $U = 0,51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

U-arvot laskettiin RakMK C4 Lämmöneristys ohjeen 2003 mukaan. Materiaalien lämmönjohtavuuksina käytettiin RakMK C4:n normaalisen lämmönjohtavuuden arvoja, jotka on ilmoitettu liitteessä C. Maanvastaisen osan U-arvo on seinän reuna- ja sisäalueen korkeuksien mukaan painotettu keskiarvo.

Rakenteen lämmöneristävyys on siis erittäin heikko RakMK D3:n vertailuarvoihin nähden. Korjauksen yhteydessä rakenteen U-arvo tulisi joko puolittaa tai parantaa uudisrakentamisen vertailuarvon tasolle. Tavoiteltu U-arvo MS 1963 -rakenteelle on $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ maanvastaiselle osalle ja $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ maanpinnan yläpuoliselle osalle. Vaadittavat eristepaksuudet eri eristysmateriaaleille on esitetty taulukossa 6.3.

Taulukko 6.3 *Tavoiteltuun U-arvoon vaadittavat eristepaksuudet materiaaleittain sisäpuoliselle eristeelle.*

EPS	140 mm
Kalsiumsilikaattilevy	210 mm
Kevytbetoni	300 mm

Sisäpuolisissa eristysratkaisuissa vanhat lämmöneristeet puretaan. Purettavien rakenteiden kokonaispaksuus on 125 mm, joten kaikilla eristysmateriaaleilla toteutettuna tavoiteltuun U-arvoon vaaditaan alkuperäistä paksumpi rakenne. Kalsiumsilikaattilevyjen paksuudet rajoittuvat yleensä 200 mm:n, joten tavoiteltua U-arvoa ei voida saavuttaa yhdellä levyllä. Tässä tutkimuksessa simulaatiot on kuitenkin rajoitettu yhden levyn paksuuteen. Kevytbetonia on saatavilla levyinä 100 mm:n paksuuteen ja harkkoina 480 mm:n paksuuteen saakka.

6.2.1 Homeindeksit

Taulukossa 6.4 on esitetty homemallin tulokset MS 1963 -rakenteelle. Homeindeksi on laskettu kussakin rakenteessa kriittisimmässä rajapinnassa eli sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa, tai niissä tapauksissa, joissa sisäpuolista eristystä ei ole, betonin sisäpinnassa. Taulukossa lyhenne up tarkoittaa ulkopuolista lämmöneristystä ja sp viittaa sisäpuoliseen eristykseen. Lyhenne mpy tarkoittaa, että maanpinnan yläpuolinen seinä eristetään.

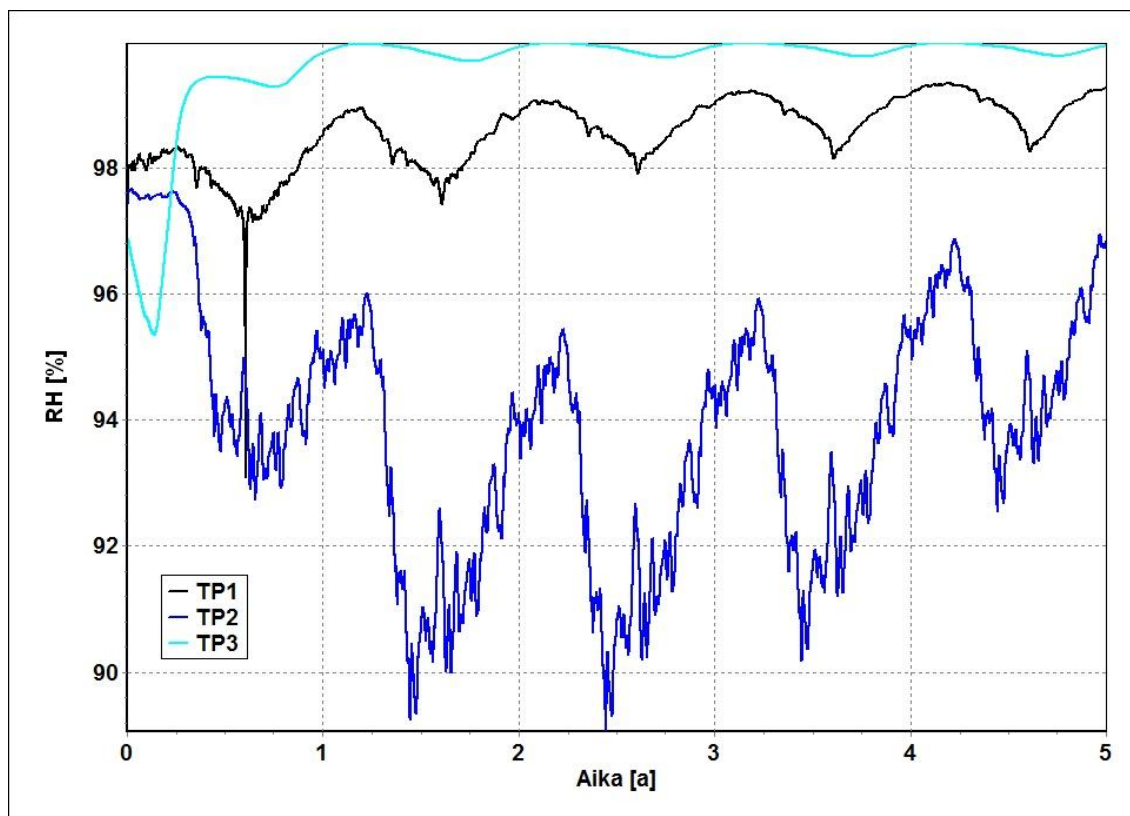
Taulukko 6.4 MS 1963 homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteittäin eri korjausvaihtoehdoilla.

Rakenne	Materiaalit rajapinnassa	HHL	Tarkastelupiste		
			1	2	3
lähtötilanne	betoni + min.vil.	3	1.931	1.584	3.401
eristämätön	betoni + sisäilma	3	0.011	0.004	0.013
up EPS, 100mm	betoni + min.vil.	3	1.979	0.029	2.957
up + mpy EPS, 100mm	betoni + min.vil.	3	0.000	0.000	2.895
up EPS, 100mm, sp purettu	betoni + sisäilma	3	0.270	2.195	3.247
up + mpy EPS, 100mm, sp purettu	betoni + sisäilma	3	0.003	0.004	0.012
sp EPS, 50mm	betoni + EPS	3	1.961	2.219	3.389
sp EPS, 100mm	betoni + EPS	3	1.782	1.800	3.000
sp EPS, 50mm, ak 80%RH	betoni + EPS	3	1.523	0.004	3.386
sp EPS, 100mm, ak 80%RH	betoni + EPS	3	1.457	1.423	3.366
sp XPS, 100mm, ak 80%RH	betoni + XPS	3	1.347	1.866	3.346
sp CaSi1, 50mm	betoni + CaSi	3	0.230	0.000	2.712
sp CaSi1, 100mm	betoni + CaSi	3	0.374	0.000	2.854
sp CaSi1, 200mm	betoni + CaSi	3	0.779	0.383	2.940
sp CaSi2, 50mm	betoni + CaSi	3	0.003	0.003	0.302
sp CaSi2, 100mm	betoni + CaSi	3	0.000	0.001	1.148
sp CaSi2, 200mm	betoni + CaSi	3	0.000	0.000	2.337
sp kevytbetoni, 50mm	betoni + k.bet	2/3	0.581	0.000	3.368
sp kevytbetoni, 100mm	betoni + k.bet	2/3	1.086	0.000	3.445

Rakenne voidaan määritellä toimivaksi, jos homeindeksin arvot ovat alle yhden kaikissa tarkastelupisteissä. Taulukossa raja-arvon 1 ylittävät arvot on korostettu punaisella.

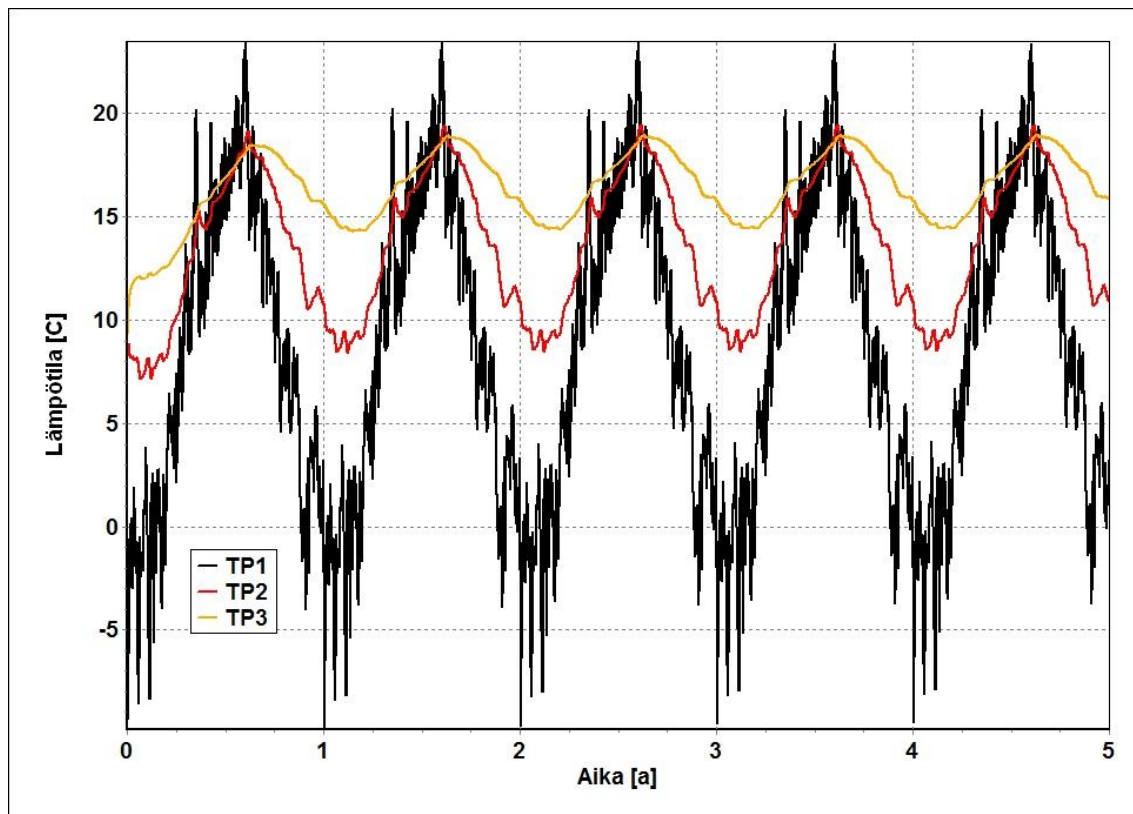
6.2.2 Lähtötilanne

Alkuperäisessä rakenteessa homeindeksi nousee hyvin korkeaksi koko seinän alueella. Kuvassa on 6.8 on esitetty suhteellisen kosteuden vaihtelut lämmöneristeen ulkopinnassa. Simulaation alussa betoniseinän alkukosteus asetettiin 97 % suhteelliseen kosteuteen. Tarkastelupisteissä TP1 ja TP3 RH tasaantuu nopeasti korkealle tasolle. Tarkastelupisteessä TP2 suhteellinen kosteus laskee simulaation alussa hieman, mutta lähtee nousuun kolmannen tarkasteluvuoden jälkeen. Trendin muutos johtuu seinään anturan kautta kapillaarisesti nousevasta kosteudesta. Kapillaarinen nousukorkeus betonissa on niin korkea, että kapillaarinen kosteusrintama saavuttaa vähitellen myös tarkastelupisteen TP2.



Kuva 6.8 MS 1963: suhteellisen kosteuden vaihtelu lämmöneristeen ulkopinnassa lähtötilanteessa. Alhaisimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP2.

Olosuhteiden tasoituttua seinän ylä- ja alaosassa (TP1 ja TP3) kosteuspitoisuus pysyttelee jatkuvasti kapillaarisella alueella: yli 98 % RH. Seinän yläosassa lämpötila vaihtelee voimakkaasti ulkolämpötilan mukaan, sillä betoni tasoittaa heikosti lämpötilan muutoksia (kuva 6.9). Lämpimään vuodenaikaan homeenkasvu on voimakasta seinän yläosassa. Syvemmälle maanpinnan alle mentäessä lämpötilan vaihtelut tasoittuvat ja lämpötila pysyy läpi vuoden yli 5°C:ssa. Lämmin seinä kuivuu sisäänpäin, joten seinän maanvastainen osa (TP2) pysyy selvästi ulkoilmaan rajoittuvaa osaa kuivempana. Korkeampi lämpötila mahdollistaa kuitenkin homeenkasvun myös hieman matalammassa kosteuspitoisuudessa seinän maanvastaisessa osassa. Seinän alaosassa anturan kautta kapillaarisesti nouseva kosteus pitää seinän jatkuvasti märkänä.



Kuva 6.9 MS 1963: lämpötilan vaihtelu lämmöneristeen ulkopinnassa alkuperäisessä rakenteessa.

MS 1963 rakenteen sisäpuolisessa lämmöneristeessä homevaurion riski on suuri, joten sisäpuoliset lämmöneristeet ja tiiliverhous on purettava.

6.2.3 Korjausvaihtoehto 1: eristämätön rakenne

Kun sisäpuoliset lämmöneristeet ja tiiliverhous puretaan, betoniseinä pääsee vapaasti kuivumaan sisäilmaan. Homeindeksi pysyy sallituissa rajoissa koko seinän alueella (ks. taulukko 6.4). Lämmöneristämättömän rakenteen lämmöneristyskyky on kuitenkin niin heikko, ettei eristämätön rakenne sovellu sellaisenaan lämpimien tilojen seinäksi. Seinän sisäosassa lämpötila laskee talviaikaan jopa 7°C:seen.

6.2.4 Korjausvaihtoehto 2: ulkopuolinen solumuovieristys

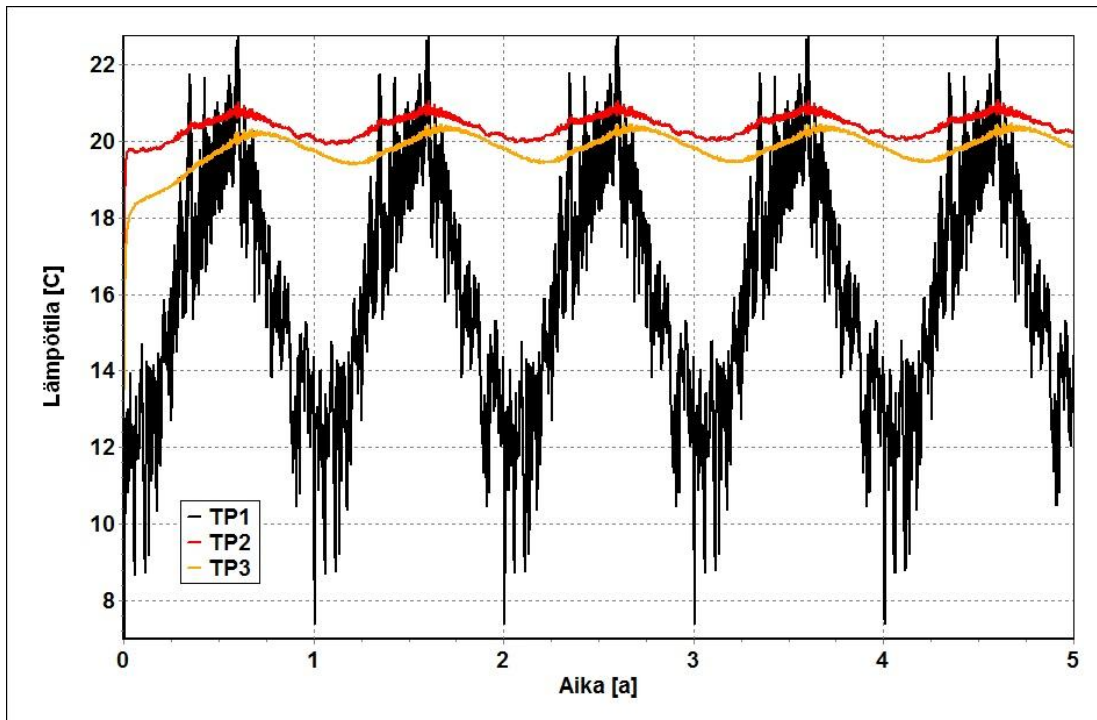
Ulkopuolisessa eristysvaihtoehdossa seinän ulkopinnassa oleva vanha vedeneristys voidaan kunnosta riippuen säilyttää tai uusida. Vedeneristeen ulkopuolelle tulee EPS lämmöneristys ja salaojitus. Korjattu seinä vastaa siis tällä hetkellä suositeltua maanvastaisen seinän toteutustapaa. Ulkopuolista eristysvaihtoehtoa tarkasteltiin erikseen neljänä tapauksena niin, että

1. eristys tehdään vain maanvastaiselle seinän osalle sisäpuoliset eristyskerrokset säilyttäen,

2. ulkopuolinen eristys ulotetaan myös maanpinnan yläpuolelle sisäpuoliset eriste-kerrokset säilyttäen,
3. eristys tehdään vain maanvastaiselle seinän osalle sisäpuoliset eristyskerrokset purkaen,
4. ulkopuolinen eristys ulotetaan myös maanpinnan yläpuolelle sisäpuoliset eriste-kerrokset purkaen.

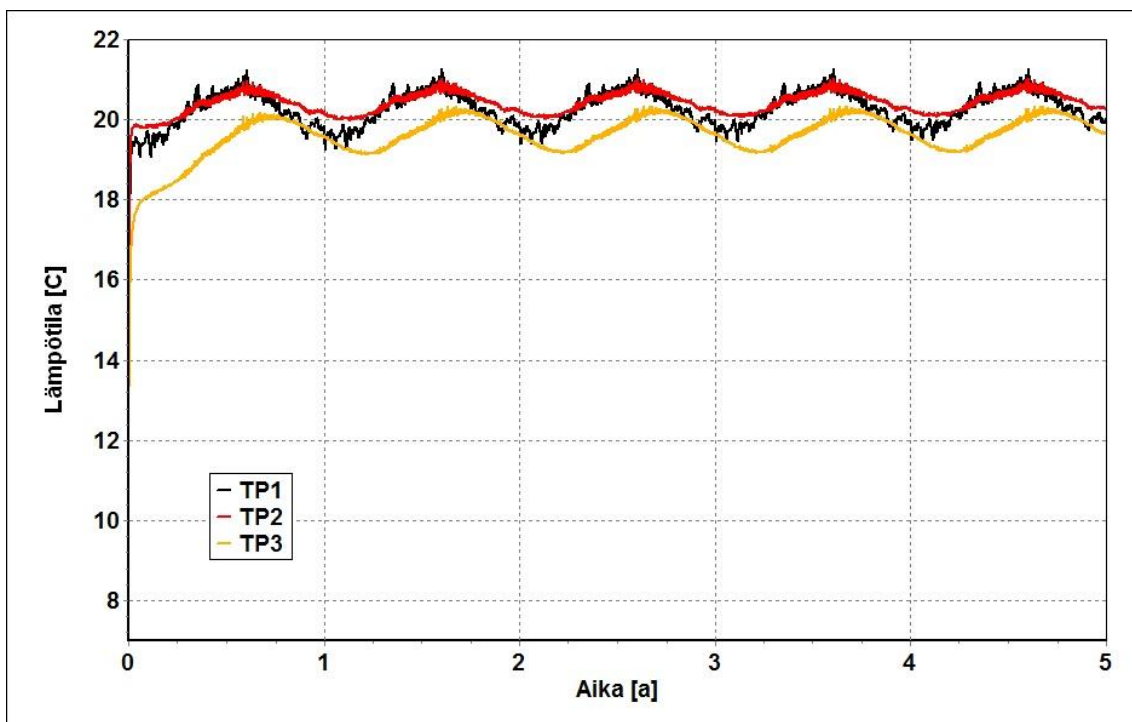
Kahdessa ensimmäisessä laskentatapauksessa sisäpuoliset eristeet jätettiin paikoilleen. Lähtötilanteen rakenne todettiin kosteusteknisesti toimimattomaksi, joten vanhoja eristeitä ei voida säilyttää. Tapaukset kuitenkin tutkittiin, jotta saadaan selville, voidaanko vanhat eristysrakenteet korvata uusilla vastaavilla rakenteilla ulkopuolisen korjauksen yhteydessä. Lisäeristeenä käytettiin 100 mm paksua EPS-eristettä, joka parantaa rakenteen U-arvon maanvastaiselle seinän osalle $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin ja maanpinnan yläpuoliselle osalle $0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:iin, kun eriste ulotetaan myös seinän yläosaan. Rakenteessa, jossa maanpinnan yläpuolista osaa ei eristetty, havaittiin homemallissa voimakasta homeen kasvua tarkastelupisteissä TP1 ja TP3. Myös tapauksessa, jossa ulkopuolinen eriste ulotetaan seinän yläreunaan saakka, homehtumisriski on olemassa seinän alaosassa (TP3) kosteuden noustessa rakenteeseen perustusten kautta.

Jos sisäpuoliset eristeet puretaan, saavutetaan 100 mm EPS-eristeellä maanvastaisessa seinässä U-arvo $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja maanpinnan yläpuolella $0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kun eriste ulotetaan myös seinän yläosaan (tapaus 4). Jos eristettä ei uloteta seinän maanpinnan yläpuoliseen osaan (tapaus 3), seinään jää huonosti eristetty alue, ja lämpötila seinän sisäpinnassa laskee talvisin jopa $7,5^\circ\text{C}$:seen, kuten nähdään kuvasta 6.10. Seinän lämmöneristävyys jää heikoksi ja kylmä seinän pinta voi aiheuttaa vedon tunnetta, joten rakenne ei sovellu lämpimiin tiloihin. Homeindeksi pysyy kuitenkin alhaisena kaikissa tarkastelupisteissä (ks. taulukko 6.4).



Kuva 6.10 MS 1963: lämpötilan muutos ulkopuolelta EPS-eristetyin seinän sisäpinnalla tapauksessa 3.

Tapauksessa 4 ulkopuolinen eriste tasoittaa lämpötilan vaihteluita seinän yläosassa (TP1), kuten kuvasta 6.11 nähdään. Myös tässä tapauksessa homeindeksi pysyy matalana.



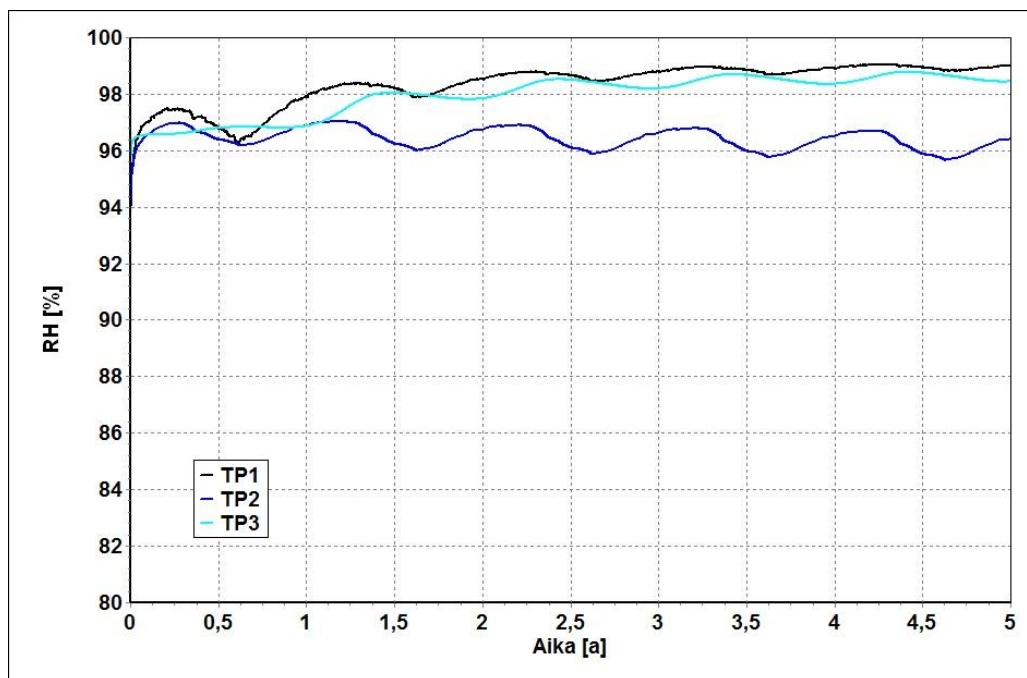
Kuva 6.11 MS 1963: lämpötilan muutos ulkopuolelta EPS-eristetyin seinän sisäpinnalla tapauksessa 4.

Ulkopuolisen korjauksen yhteydessä sisäpuoliset eristysrakenteet on purettava eikä sisäpintaan saa asentaa kosteuden haihtumista estäviä materiaaleja. Ulkopuolinen solumuovieriste on syytä jatkaa yhtenäisenä seinän yläosaan saakka ja lämmöneristeen sisäpuolella tulee olla yhtenäinen vedeneriste. Ulkopuolisen eristysratkaisun suositeltava toteuttamistapa edellyttää siis muutoksia myös rakennuksen julkisivuun. MS 1963 -tyyppisessä rakenteessa korjausrakentamisen eristysvaatimukset täyttyvät esimerkiksi 150 mm:n EPS-eristeellä.

6.2.5 Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen solumuovieristys

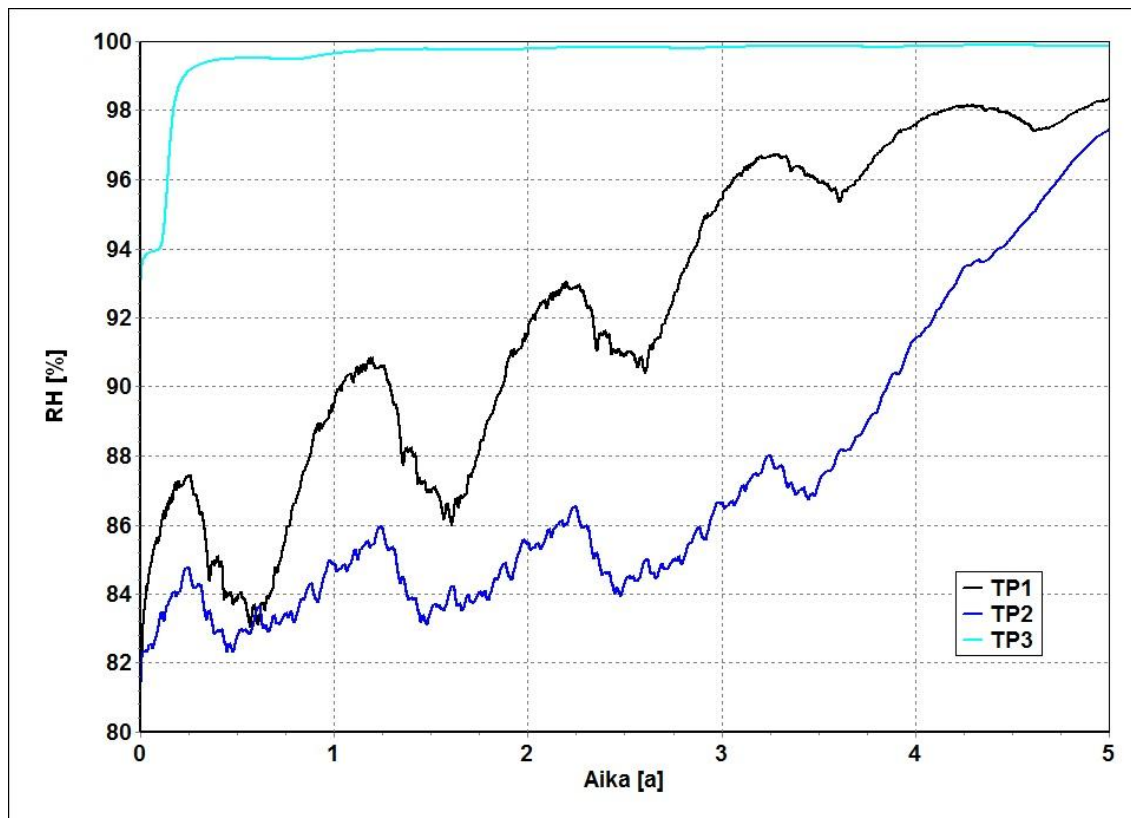
Sisäpuoliseksi eristeeksi kokeiltiin 50 mm ja 100 mm paksua EPS-eristettä. Korjausratkaisussa kantavan seinän vanhat sisäpuoliset lämmöneristeet poistetaan ja betonin sisäpintaan asennetaan EPS-eriste. Rakenteen ulkopinnalla on vanha vedeneriste, joka estää kosteuden pääsyn betoniin ulkopuolelta. Sisäpuolinen eriste voidaan ulottaa koko seinän alueelle, joten seinään ei jää huonosti eristettyä aluetta. 100 mm:n eristypaksuudella rakenteen U-arvoksi saadaan maanvastaiselle seinälle $0,31 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja maanpinnan yläpuoliselle seinälle $0,38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Taulukosta 6.4 nähdään, että homeindeksi ylittää raja-arvon 1 kaikissa tarkastelupisteissä sekä 50 että 100 mm:n eristepaksuudella. Betoniseinän alkukosteudeksi laskentatarkasteluissa asetettiin 97 % RH. Seinä ei pääse kuivumaan EPS-eristeen läpi, joten kosteuspitoisuus pysyy korkeana koko simulaation ajan (ks. kuva 6.12). Pienet suhteellisen kosteuden vaihtelut johtuvat pääosin lämpötilan muutoksista.



Kuva 6.12 MS 1963: suhteellisen kosteuden muutokset lämmöneristeen ulkopinnassa 100 mm:n EPS-eristeellä, kun seinän alkukosteus on 97 % RH. Alhaisimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP2.

Betonin korkea alkukosteus voi vaikuttaa merkittävästi kosteustekniseen toimintaan heikosti kuivuvassa rakenteessa. Jotta korkean alkukosteuden vaikutus saataisiin rajattua pois, rakenne simuloitiin uudestaan matalammalla alkukosteudella. Betonin alkukosteudeksi asetettiin 80 % RH. Käytännössä kosteuden alentaminen 80 %:iin RH vaatii rakenteen aktiivista kuivatusta ennen lämmöneristeen asentamista. Kuvassa 6.13 on suhteellisen kosteuden kuvaajat kuivatun rakenteen osalta.

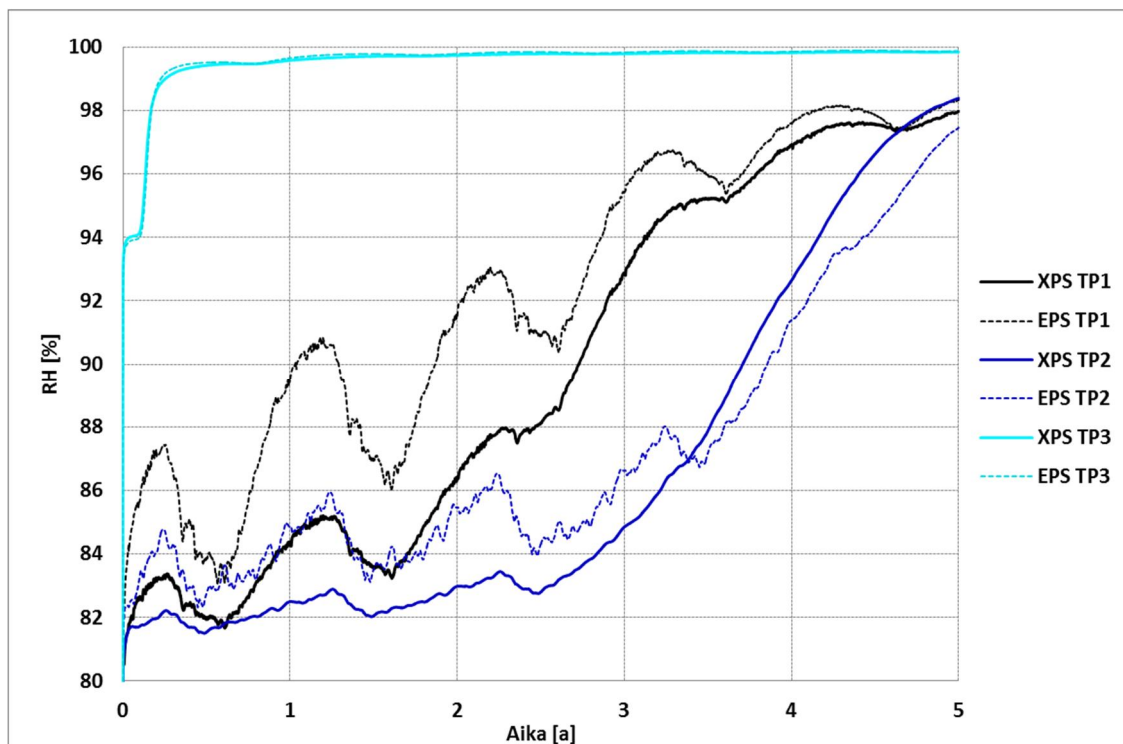


Kuva 6.13 MS 1963: suhteellisen kosteuden muutokset lämmöneristeen ulkopinnassa 100 mm:n EPS-eristeellä, kun seinän alkukosteus on 80 % RH. Alhaisimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP2.

Kuvaajasta nähdään, että suhteellinen kosteus nousee korkeaksi kaikissa tarkastelupisteissä, kuten 97 %:n RH alkukosteudella. Seinän keskiosassa, missä kosteusrasitusta ei ole RH nousee kolmannen tarkasteluvuoden jälkeen jyrkästi, kun perustusten kautta kohoava kosteusrintama saavuttaa tarkastelupisteen. Taulukossa 6.4 on homeindeksin arvot kuivatulle ja sisäpuolelta EPS-levyllä eristetyllä rakenteelle. Korkeita homeindeksejä havaitaan sisäpuolelta EPS-eristetyssä seinässä kaikissa tarkastelupisteissä. EPS-eristeen käyttö sisäpuolisena eristeenä aiheuttaa siis home- ja mikrobivaurioriskin myös kuivatulla seinällä.

EPS-eristeen lisäksi sisäpuolinen solumuovieristys simuloitiin XPS-eristeellä toteutettuna 80 % RH alkukosteuteen kuivatulla seinällä. EPS-eriste on XPS-eristettä paremmin kosteutta läpäisevää, joten rakenne pääsee kuivumaan paremmin. Jos kuitenkin ongelmana on sisäpuolinen kosteusrasitus, tiiviimpi XPS voi olla kosteusteknisesti toimi-

vampi ratkaisu. Kun verrataan RH:n kehitystä XPS-eristeellä (kuva 6.14) vastaaviin EPS-eristeellä saatuihin tuloksiin, huomataan, että tarkastelupisteissä TP1 ja TP2 XPS:llä eristettyssä seinässä suhteellinen kosteus kasvaa hitaammin kuin EPS:llä eristetyssä. Tarkastelupisteessä TP3 ero on pienempi, koska kosteusrasitus tulee pääosin ulkopuolelta.



Kuva 6.14 MS 1963: suhteellisen kosteuden muutokset lämmöneristeen ulkopinnassa 100 mm:n eristepaksuudella, kun seinän alkukosteus on 80 % RH.

Kosteuspitoisuus vaikuttaa suoraan homeindeksiin, joten samoin homeindeksi on XPS:llä korkeampi tarkastelupisteessä 3 ja matalampi tarkastelupisteissä 1 ja 2 (taulukko 6.4). Kuten EPS-eristeelläkin, myös XPS-eristeen tapauksessa homeindeksit nousevat yli yhden kaikissa tarkastelupisteissä, eli homeen kasvua tapahtuu. Osissa, joissa pääasiallinen kosteusrasitus tulee diffuusiolla sisäilmasta tiiviimpi eriste siis estää kosteuden pääsyn rakenteeseen pitäen sen kuivempana, kun taas osissa, joissa kapillaarinen kosteuden nousu on merkittävämpi rasitus, tiiviimpi eriste estää kosteuden haihtumisen ja rakenne kastuu nopeammin.

Simulaatioiden perusteella solumuovieristeet eivät sovellu MS 1963 -tyyppisen rakenteen sisäpuoliseen lämmöneristämiseen. Vaikka seinä on ulkopuolelta vedeneristetty, kosteutta voi päästä rakenteeseen maanpinnan yläpuolisen seinän osan tai perustusten kautta vesihöyrynä. Tiivis solumuovieriste estää seinän kuivumisen sisäänpäin, joten home- ja mikrobivaurioiden riski on suuri.

6.2.6 Korjausvaihtoehto 4: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys

Seinän sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi kokeiltiin kahta erityyppistä kalsiumsilikaattieristettä: CaSi 1 ja CaSi 2. Eristepaksuuden vaikutusta verrattiin simuloimalla erikseen tapaukset 50, 100 ja 200 mm paksuisilla levyillä. Sisäpuolelta eristettäessä vanhat eristysrakenteet puretaan pois ja tilalle asennetaan kalsiumsilikaattilevyt. Vedeneristys jää rakenteen ulkopuolelle. 100 mm:n lisäeristeellä rakenteen U-arvoksi saadaan maanvastaiselle seinälle $0,41 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja maanpinnan yläpuoliselle seinälle $0,55 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Perustusten kautta nouseva maakosteus osoittautuu ongelmaksi myös sisäpuolisen kalsiumsilikaattieristeyksen tapauksessa. Tarkastelemalla taulukon 6.4 homeindeksejä nähdään, että kummallakin kalsiumsilikaattieristeellä homeindeksi pysyy sallituissa rajoissa seinän keski- ja yläosassa (TP1 ja TP2). CaSi 1 -levyllä homeindeksi TP3:ssa nousee kaikilla eristyspaksuuksilla yli yhden. CaSi 2 -eristeellä homeindeksi pysyy sallituissa rajoissa TP3:ssa vain 50 mm:n eristeellä.

Näiden tarkasteluiden pohjalta voidaan sallia vain CaSi 2 -tyyppisen 50 mm paksun kalsiumsilikaattieristeen käyttö. Kapillaarikatkon asentaminen anturan ja seinän väliin saattaisi mahdollistaa myös suurempien erityspaksuuksien käytön. Korjausratkaisun kosteusteknisen toimivuuden varmistaminen vaatii kuitenkin lisätutkimuksia.

6.2.7 Korjausvaihtoehto 5: sisäpuolinen kevytbetonieristys

Kevytbetonilla eristettäessä vanhat veden- ja lämmöneristeet puretaan pois ja tilalle asennetaan uusi eristys kevytbetonilaatoista tai -harkoista muuraamalla. Kevytbetonieristystä testattiin 50 ja 100 mm:n eristyspaksuuksilla.

Kevytbetonin lämmönjohtavuus on tyypillisiä lämmöneristemateriaaleja korkeampi ($\lambda \approx 0,1 \text{ W/(mK)}$), joten korjausrakentamisen tavoitteisiin vaaditaan noin 310 mm:n eristepaksuutta. 100 mm:n eristeellä päästään maanvastaisessa seinässä U-arvoon $0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja maanpinnan yläpuolisessa osassa $0,73 \text{ W/(m}^2\text{K)}$:n eli seinän lämmöneristävyys jää hieman alkuperäistä heikommaksi.

Taulukon 6.4 homeindeksejä tarkasteltaessa huomataan, että jo 50 mm:n eristyspaksuuksilla sallittu homeindeksin arvo ylittyy TP3:n kohdalla. 100 mm kevytbetonieristeellä homeindeksi nousee yli yhden myös TP1:ssä. Näihin tuloksiin perustuen kevytbetonia ei voida käyttää MS 1963 -tyyppisen seinän sisäpuolisena lämmöneristeinä.

6.3 Maanvastainen seinä 1990

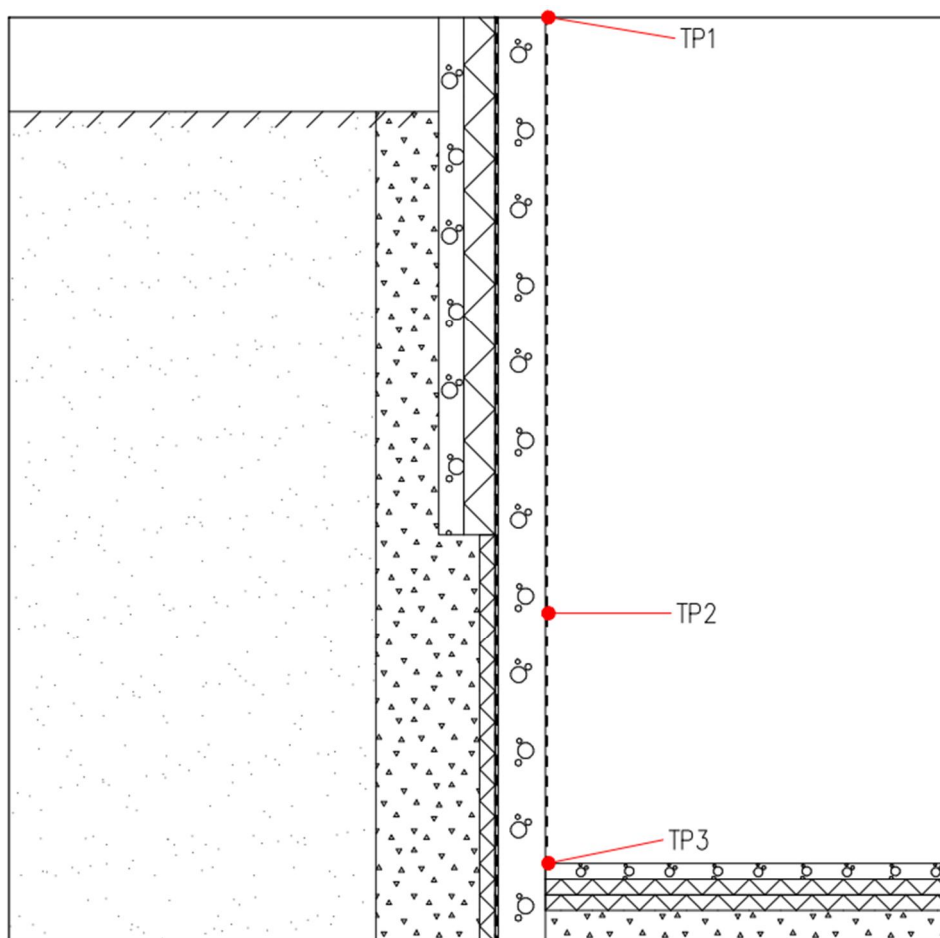
MS 1990 on ulkopuolelta lämmön- ja vedeneristetty maanvastainen seinä. Lämmöneriste jatkuu yhtenäisenä seinän maanpinna yläpuoliseen osaan. Rakenne vastaa ny-

kysuositusten mukaista maanvastaista seinää, mutta lämmöneristys ei täytä tämän hetkisiä vaatimuksia. Kuvassa 6.15 on esitetty alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteiden sijainnit.

MS 1990 rakenteelle tarkasteltiin simuloimalla alkuperäisen rakenteen lisäksi 3 eri korjausvaihtoehtoa:

1. sisäpuolinen solumuovieristys, EPS 50 mm ja 100 mm eristepaksuuksilla sekä XPS 100 mm eristepaksuudella
2. sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys 2 eristetyyppiä 50 mm, 100 mm ja 200 mm eristyspaksuuksilla
3. sisäpuolinen kevytbetonieristys, 50 mm, 100 mm ja 200 mm eristyspaksuuksilla.

Ulkopuolista eristysratkaisua ei tutkittu, koska sen oletetaan toimivan kuten alkuperäinen rakenne.



Kuva 6.15 MS 1990 alkuperäinen rakenne ja tarkastelupisteiden sijainnit.

Rakenteen U-arvoiksi saatiin

- maanpinnan yläpuoliselle seinälle $U = 0,51 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- ja maanvastaiselle osalle $U = 0,36 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

U-arvot laskettiin RakMK C4 Lämmöneristys ohjeen 2003 mukaan. Materiaalien lämmönjohtavuuksina käytettiin RakMK C4:n normaalisen lämmönjohtavuuden arvoja, jotka on ilmoitettu liitteessä C. Maanvastaisen osan U-arvo on seinän reuna- ja sisäalueen korkeuksien mukaan painotettu keskiarvo.

Rakenteen lämmöneristävyys on heikko RakMK D3:n vertailuarvoihin nähden. Korjauksen yhteydessä rakenteen U-arvo tulisi joko puolittaa tai parantaa uudisrakentamisen vertailuarvon tasolle. Tavoiteltu U-arvo MS 1990 -rakenteelle on $0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ maanvastaiselle osalle ja $0,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ maanpinnan yläpuoliselle osalle. Vaadittavat eristepaksuudet eri eristysmateriaaleille on esitetty taulukossa 6.5.

Taulukko 6.5 *Tavoiteltuun U-arvoon vaadittavat lisäeristepaksuudet materiaaleittain sisäpuoliselle eristeelle.*

EPS	110 mm
Kalsiumsilikaattilevy	190 mm
Kevytbetoni	270 mm

Kaikkia eristysmateriaaleja on saatavilla eristysvaatimukset täyttävinä paksuuksina.

6.3.1 Homeindeksit

Taulukossa 6.6 on esitetty homemallin tulokset MS 1990 -rakenteelle. Homeindeksi on laskettu kussakin rakenteessa kriittisimmässä rajapinnassa eli sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa, tai lähtötilanteessa, jossa sisäpuolista eristystä ei ole, betonin ulko- sekä sisäpinnassa.

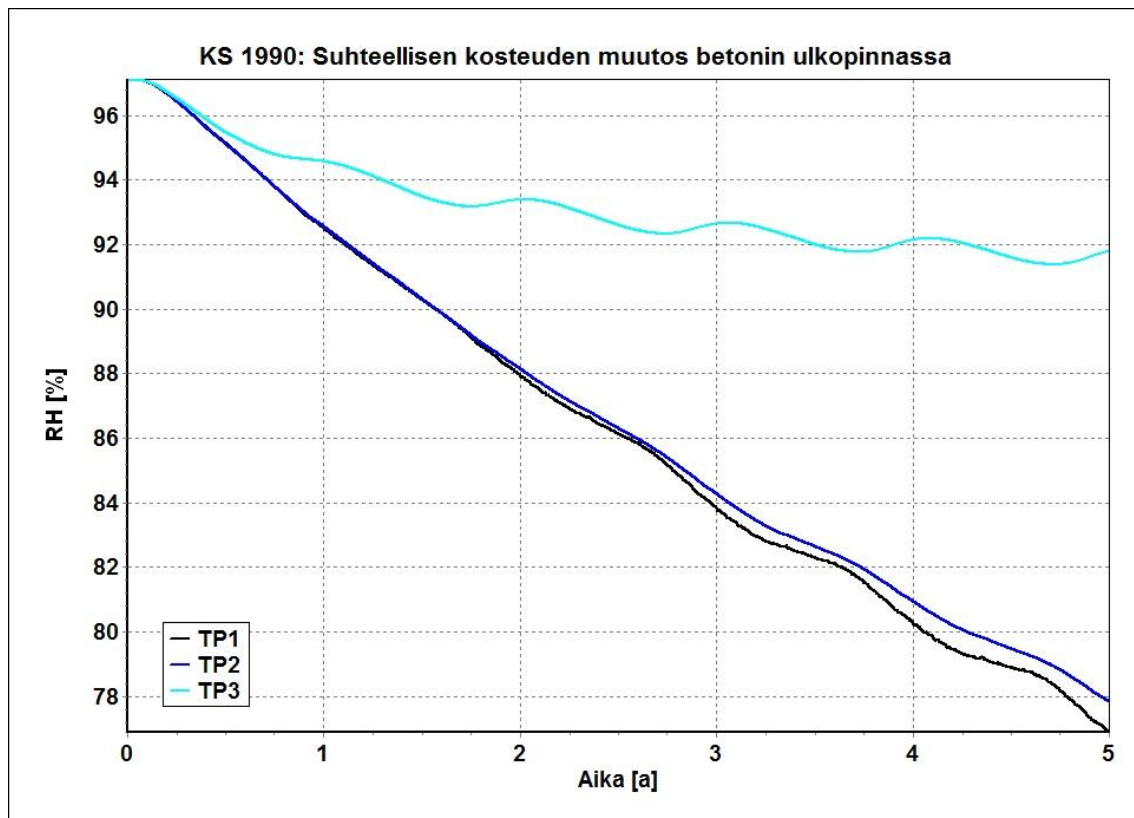
Taulukko 6.6 MS 1963 homeindeksin maksimiarvot tarkastelupisteittäin eri korjausvaihtoehdoilla.

Rakenne	Materiaalit rajapinnassa	HHL	Tarkastelupiste		
			1	2	3
lähtötilanne, betonin ulkopinta	betoni + bitumi	4	0.00	0.00	0.45
lähtötilanne, betonin sisäpinta	betoni + sisäilma	3	0.00	0.00	0.00
sp EPS 50mm, ak 97%RH	betoni + EPS	3	0.05	0.00	0.83
sp EPS 100mm, ak 97%RH	betoni + EPS	3	1.38	1.14	2.03
sp EPS 50mm, ak 80%RH	betoni + EPS	3	0.00	0.00	0.60
sp EPS 100mm, ak 80%RH	betoni + EPS	3	0.01	0.00	1.52
sp EPS 200mm, ak 80%RH	betoni + EPS	3	0.03	0.00	2.41
sp XPS 100mm, ak 80%RH	betoni + XPS	3	0.00	0.00	1.94
sp CaSi 50mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.00
sp CaSi 100mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.00
sp CaSi 200mm	betoni + CaSi	3	0.08	0.00	0.34
sp CaSi2 50mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.00
sp CaSi2 100mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.00
sp CaSi2 200mm	betoni + CaSi	3	0.00	0.00	0.00
sp kevytbetoni 50mm	betoni + k.bet	2/3	0.00	0.00	0.02
sp kevytbetoni 100mm	betoni + k.bet	2/3	0.00	0.00	0.19
sp kevytbetoni 200mm	betoni + k.bet	2/3	0.07	0.00	1.51

Rakenne voidaan määritellä toimivaksi, jos homeindeksin arvot ovat alle yhden kaikissa tarkastelupisteissä. Taulukossa raja-arvon 1 ylittävät arvot on korostettu punaisella.

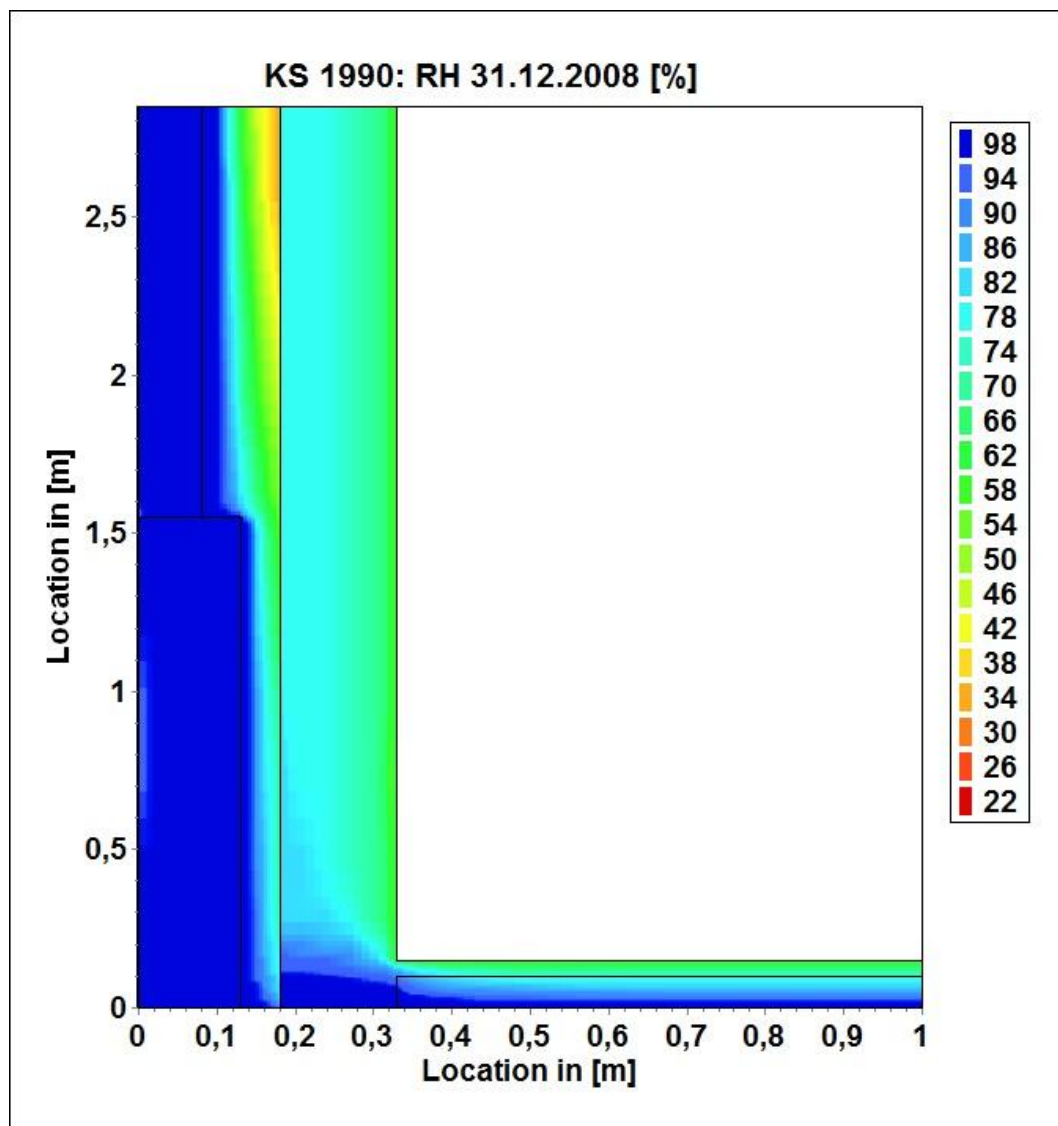
6.3.2 Lähtötilanne

Simulaation alussa betoniseinän alkukosteus asetettiin 97 % suhteelliseen kosteuteen. Viiden vuoden tarkastelujakson aikana rakenne kuivuu tarkastelupisteissä TP1 ja TP2 alle 80 %:iin RH. Kuvasta 6.16 nähdään, että kuivuminen ei hidastu merkittävästi tarkastelujakson loppua kohden, joten voidaan olettaa, että rakenne jatkaa kuivumista edelleen. Tarkastelupisteessä TP3 kuivuminen hidastuu selvästi ja tasoittuu noin 92 % RH vaiheille.



Kuva 6.16 MS 1990: suhteellisen kosteuden muutos kantavan betoniseinän ulkopinnassa viiden vuoden tarkastelujakson aikana. Alimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP1.

Kuvassa 6.17 on esitetty MS 1990 rakenteen suhteellinen kosteus tarkastelujakson lopussa. Kuvasta nähdään, että kosteutta nousee rakenteeseen perustusten kautta, mutta rakenne pystyy luovuttamaan kosteutta riittävän nopeasti pysyäkseen kuivana. Suhteellinen kosteus laskee alle 80 % RH lähes koko seinän alueella. Vain seinän alaosassa RH jää hieman korkeammaksi niin, että lattian tasossa seinän ulkopinnan suhteellinen kosteus on noin 92 % RH.



Kuva 6.17 MS 1990 -rakenteen kosteusKenttä 5. simulaatiovuoden lopussa.

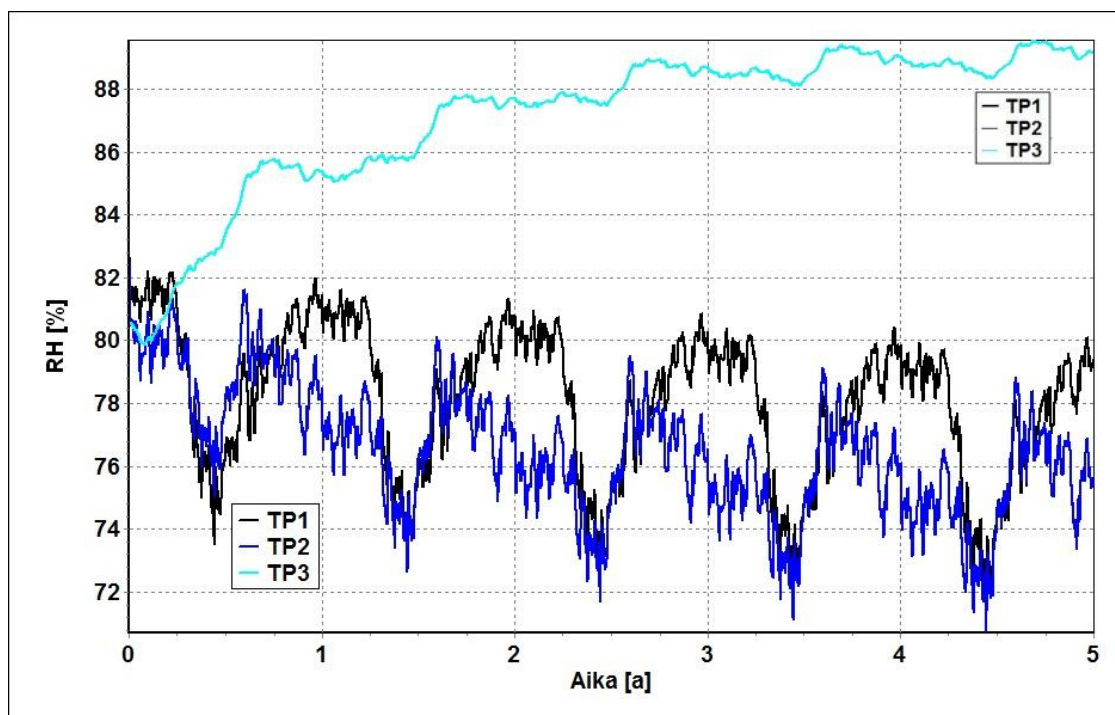
Homeindeksin arvot lähtötilanteessa on esitetty taulukossa 6.6. Alkuperäisessä rakenteessa homeindeksi pysyy sallituissa rajoissa kaikissa tarkastelupisteissä, sekä betonin ulko- että sisäpinnalla. Rakenne toimii hyvin sellaisenaan, mutta lämmöneristeen lisäyksellä voidaan parantaa rakennuksen energiatehokkuutta.

6.3.3 Korjausvaihtoehto 1: sisäpuolinen solumuovieristys

Ensimmäisenä korjausvaihtoehtona tutkittiin sisäpuolista solumuovieristystä. Sisäpuoliseksi eristeeksi kokeiltiin 50, 100 ja 200 mm paksua EPS-eristettä. Sisäpuolinen eriste voidaan ulottaa koko seinän alueelle, eikä seinään jää huonosti eristettyä aluetta. 100 mm:n eristyspaksuudella rakenteen U-arvoksi saadaan maanvastaiselle seinälle 0,19 W/(m²K) ja maanpinnan yläpuoliselle seinälle 0,23 W/(m²K).

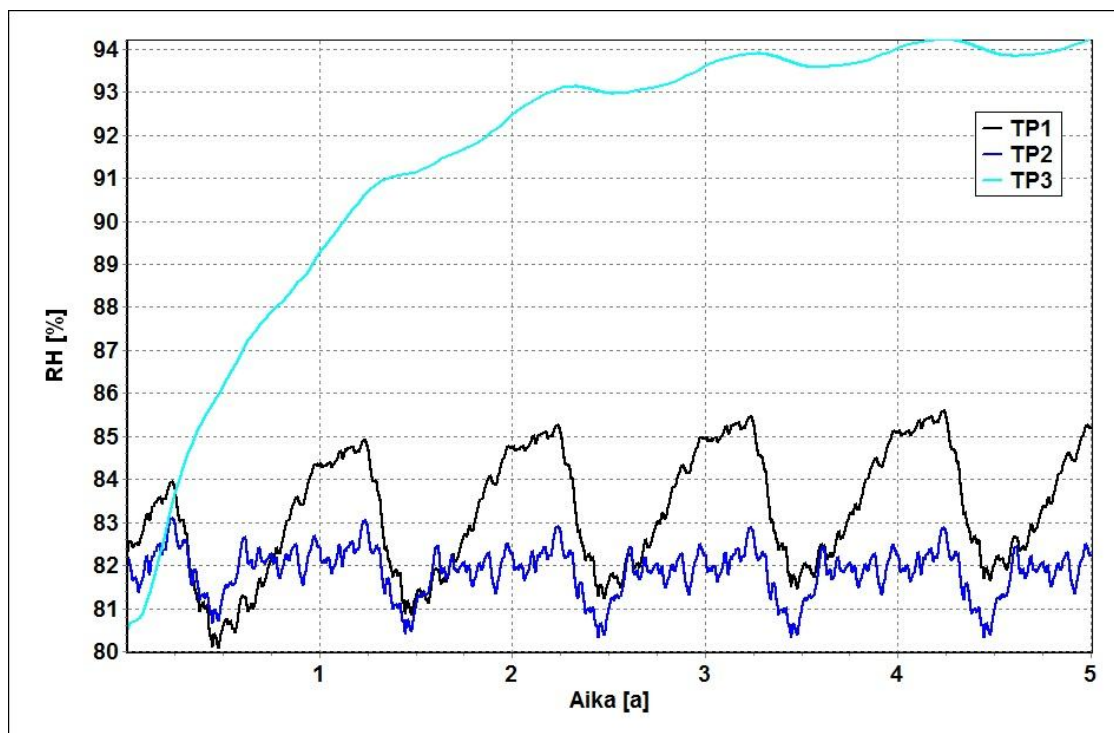
Alkuperäisessä rakenteessa betoni kuivui viiden vuoden simulaation aikana niin, että suhteellinen kosteus koko seinässä laski alle 80 % RH. Näin ollen betonin alkukosteudeksi sisäpuolisen eristyskerroksen tapauksessa voidaan asettaa 80 % RH.

Taulukosta 6.6 nähdään, että 50 mm EPS-eristeellä homeindeksi pysyy alle yhden kaikissa tarkastelupisteissä, kun betonin alkukosteus on 80 % RH. Kyseisen rakenteen suhteellisen kosteuden kuvaajat tarkastelupisteittäin on esitetty kuvassa 6.18. Kuvasta nähdään, että TP1:n ja TP2:n kohdalla RH käyrä laskee niin, että suhteellisen kosteuden maksimi jää 80 % tasolle. Perutusten kautta nouseva maakosteus nostaa suhteellista kosteutta TP3:ssa. Ohuella EPS-eristeellä rakenteen kuivumiskyky on kuitenkin riittävä, eikä suhteellinen kosteus nouse yli 90 %:n.



Kuva 6.18 MS 1990: suhteellinen kosteus sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa 50 mm:n EPS-eristeellä, kun betonin alkukosteus on 80 % RH.

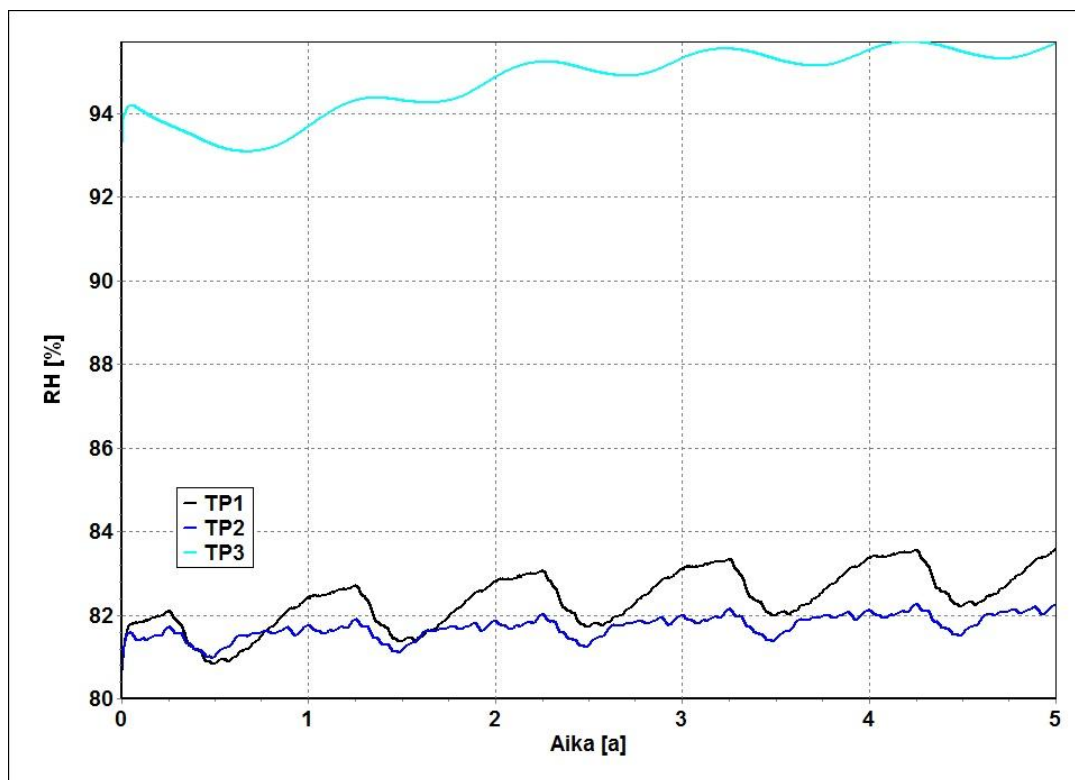
Kun eristyspaksuutta kasvatetaan 100 mm:iin, suhteellinen kosteus TP3:ssa nousee korkeammaksi ja homeindeksi ylittää sallitun rajan (kuva 6.19). TP1:n ja TP2:n kohdalla homeindeksi pysyy matalana mutta suhteellinen kosteus kääntyy nousuun. Olosuhteet seinän yläosassa voivat siis muodostua kriittisiksi pidemmällä aikavälillä. Tämän takia sisäpuolisen EPS-eristeen paksuus on rajoitettava 50 mm:iin.



Kuva 6.19 MS 1990: suhteellinen kosteus sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa 100 mm:n EPS-eristeellä, kun betonin alkukosteus on 80 % RH. Matalimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP2.

Sisäpuolista EPS-eristettä tarkasteltiin myös tapauksessa, jossa betoni alkukosteus on korkeampi: 97 % RH. Tällöinkään 50 mm eristeellä homeindeksi ei nouse kriittiselle tasolle. 100 mm eristyspaksuudella homeen kasvua on kuitenkin havaittavissa kaikissa tarkastelupisteissä (ks. taulukko 6.6). 50 mm:n eristyspaksuudella rakenteen alkukosteudella ei siis ole merkitystä korjatun rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta.

EPS-eristeen lisäksi sisäpuolinen solumuovieristys simuloitiin 100 mm:n XPS-eristeellä toteutettuna. Betonin alkukosteus asetettiin tässäkin tapauksessa 80 %:n suhteelliseen kosteuteen. XPS-eristeellä homeindeksin tulokset pysyvät sallituissa rajoissa tarkastelupisteissä TP1 ja TP2 (kuva 6.20). Homeindeksi TP3:n kohdalla nousee kuitenkin yli yhden. Rakenteen kuivuminen XPS-eristeen läpi on hitaampaa kuin EPS:n, joten XPS:n käyttö ei ole suositeltavaa.



Kuva 6.20 MS 1990: suhteellinen kosteus sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa 100 mm:n XPS-eristeellä, kun betonin alkukosteus on 80 % RH. Matalimmat suhteellisen kosteuden arvot esiintyvät tarkastelupisteessä TP2.

Simulaatioissa seinän alaosaan ei ole mallinnettu määräyksissä vaadittavaa kapillaarikatkoa, mikä estää maakosteuden imeytymisen anturasta seinään. Mikäli kapillaarikatko on asennettu oikeaoppisesti anturan ja seinän väliin, tarkastelupisteen TP3 kosteusolosuhteet ovat huomattavasti simuloitua suotuisammat ja myös paksummat solu- ja muovieristeet saattavat olla hyväksyttäviä. Tässä tutkimuksessa kyseisiä tapauksia ei kuitenkaan ole tutkittu, joten niiden kosteusteknisen toiminnan varmistaminen vaatii lisätutkimuksia. Tehtyjen simulaatioiden perusteella MS 1990 -tyyppisen rakenteen lämmöneristystä voidaan parantaa asentamalla seinän sisäpuolelle korkeintaan 50 mm paksu EPS-eristys.

6.3.4 Korjausvaihtoehto 2: sisäpuolinen kalsiumsilikaattieristys

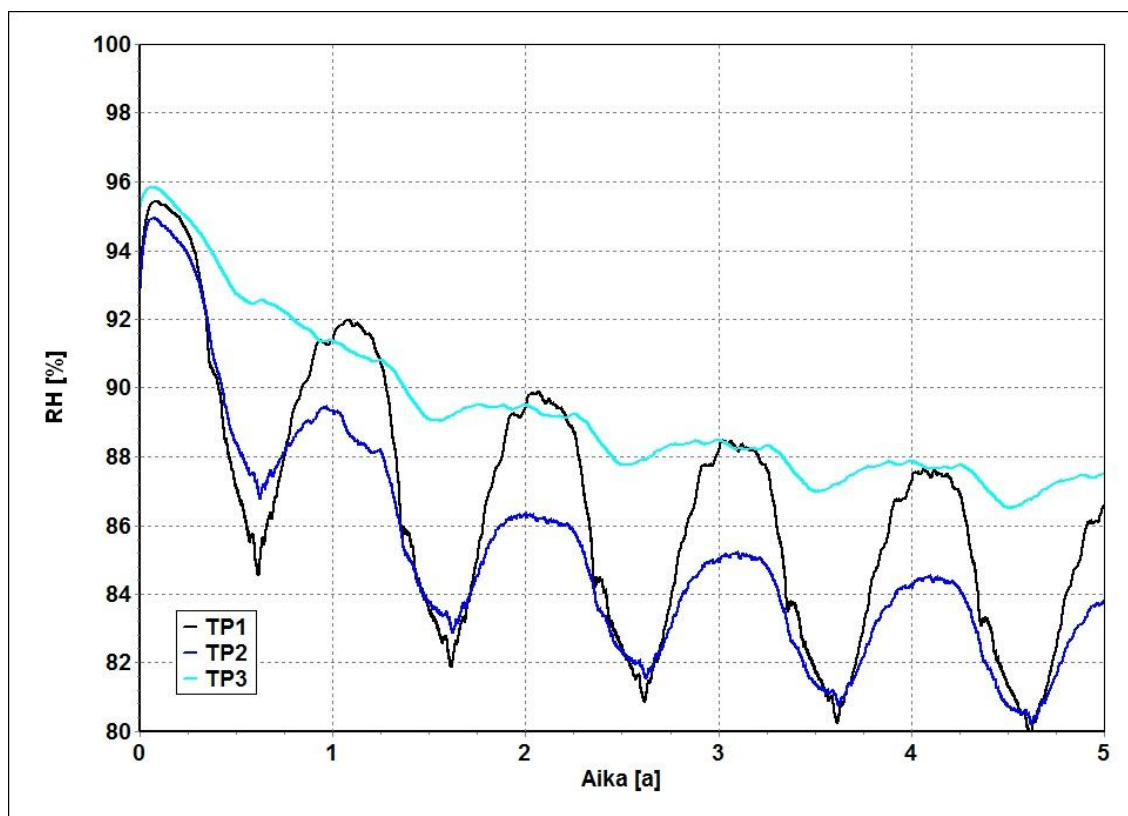
Seinän sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi kokeiltiin kahta erityyppistä kalsiumsilikaattieristettä: CaSi 1 ja CaSi 2. Eristepaksuuden vaikutusta verrattiin simuloimalla erikseen tapaukset 50, 100 ja 200 mm paksuisilla levyillä. 100 mm:n eristyspaksuudella rakenteen U-arvoksi saadaan maanvastaiselle seinälle 0,24 W/(m²K) ja maanpinnan yläpuoliselle seinälle 0,29 W/(m²K).

Homeindeksin tulokset on esitetty taulukossa 6.6. Kaikilla eristyspaksuuksilla homeindeksit pysyvät lähes nollassa. CaSi 1 -levyllä 200 mm:n eristepaksuus tuottaa hieman

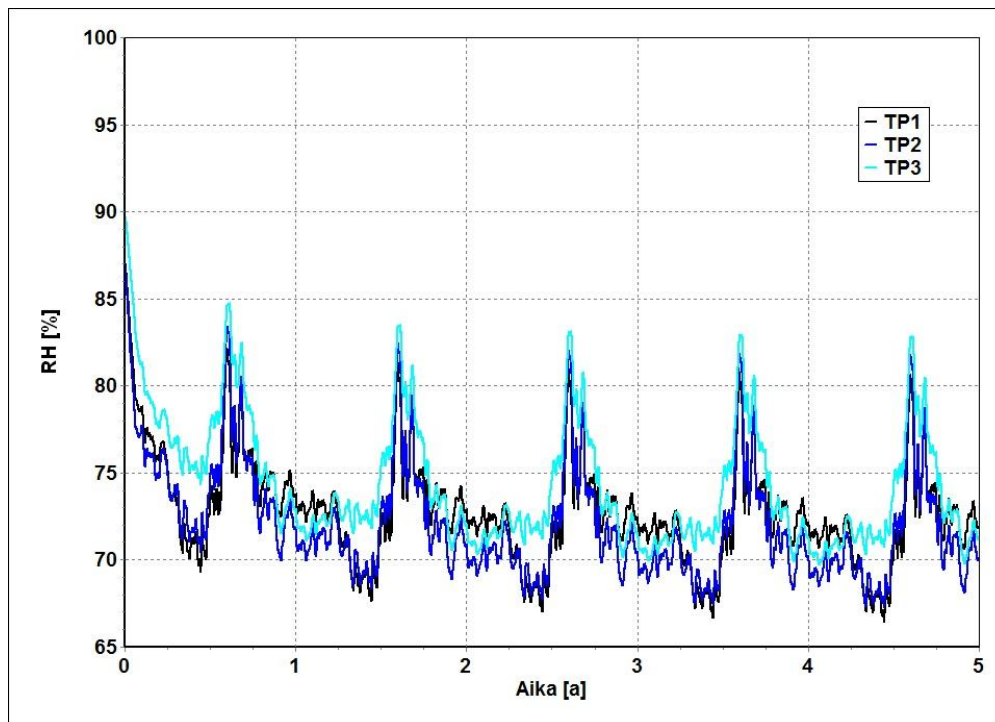
muita korkeamman arvon tarkastelupisteessä TP3 (0,34). homeindeksi ei kuitenkaan nouse yli yhden seinän alaosassa.

Hometarkasteluissa kalsiumsilikaatin homeutumisherkkyysluokkana käytettiin HHL 3. Kalsiumsilikaattia pidetään hyvin kestäväenä materiaalina homeutumisherkkyyn suhteen, mutta koska materiaaleja ei ole testattu, käytetään alemmaa luokkaa, jolloin tulokset ovat varmalla puolella. Betoni seinän alkukosteudeksi asetettiin 97 % RH, eli myös lähtötilanteen kannalta tulokset kuvaavat todellista kriittisempiä olosuhteita.

200 mm paksuisella kalsiumsilikaattilevyllä eristetyt rakenteen kosteuskäyrät on esitetty kuvassa 6.21 CaSi 1 -eristeelle ja kuvassa 6.22 CaSi 2 -eristeelle. CaSi 2 -eristeellä kosteuspitoisuus tasoittuu jo kolmannen vuoden aikana lähes vakio-olosuhteisiin. CaSi 1 -eristeellä tasoittuminen on hitaampaa, mutta trendin ollessa laskeva kosteuden taantuminen voidaan katsoa riittäväksi. Viimeisen simulaatiovuoden tulokset, joita hometarkasteluissa käytetään, kuvaavat hyvin eristeen sisäpinnan kriittisimpiä olosuhteita.



Kuva 6.21 MS 1990: suhteellinen kosteus sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa 200 mm:n CaSi 1 -eristeellä.



Kuva 6.22 MS 1990: suhteellinen kosteus sisäpuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa 200 mm:n CaSi 2 -eristeellä.

Simulaatioiden perusteella kalsiumsilikaatti sopii hyvin MS 1990 -tyyppisen maanvastaisen seinän sisäpuoliseen lisälämmöneristämiseen. Ulkopuolinen lämmöneristys pitää rakenteen kuivana ja lämpimänä, joten rakenteen homehtumisriski on hyvin pieni. Suuria eristyspaksuuksia käytettäessä on kuitenkin syytä varmistaa materiaalin kosteuden-siirto-ominaisuudet.

6.3.5 Korjausvaihtoehto 3: sisäpuolinen kevytbetonieristys

Sisäpuolista kevytbetonieristystä testattiin 50, 100 ja 200 mm:n eristyspaksuuksilla. 100 mm:n eristeellä päästään maanvastaisessa seinässä U-arvoon $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja maanpinnan yläpuolisessa osassa $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$:n.

Taulukossa 6.6 ilmoitettuja homeindeksejä tarkasteltaessa nähdään, että 100 mm:n eristyspaksuuteen asti homeindeksin arvot pysyvät sallituissa rajoissa kaikissa tarkastelupisteissä. Kun eristyspaksuutta kasvatetaan 200 mm:iin, homeindeksin arvo TP3:ssa nousee yli yhden.

MS 1990 -tyyppisen rakenteen lämmöneristystä voidaan parantaa sisäpuolisella kevytbetonieristyksellä. Eristyspaksuus ei kuitenkaan saa ylittää 100 mm:ä, joten korjausrakentamisen U-arvovaatimuksia ei pystytä täyttämään kevytbetonieristeellä.

6.4 Korjausratkaisujen toimivuus tulevaisuuden ilmastossa

Rakennusfysikaalisista testivuosista on olemassa myös tulevaisuuden ilmastoa 50 ja 100 vuoden päästä kuvaavat säätiedot. Tulevaisuudessa lämpötilan ennustetaan nousevan ja sademäärien kasvavan nykyisestä, joten tulevaisuuden olosuhteet ovat kosteusteknisesti kriittisemmät. MS 1959 ja MS 1963 -rakenteille sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi soveltuu vain 50 mm CaSi 2 -eriste, MS 1990 -rakenteelle sen lisäksi myös 50 mm EPS tai 100 mm kevytbetoni. 50 mm paksuisella CaSi 2 -levyllä sisäpuolelta eristetyistä rakenteista laskettiin perustapausten lisäksi tapaukset tulevaisuuden ilmastossa Jokioisen 2050 -testivuoden säätiedoilla.

Taulukko 6.7 50 mm CaSi 2 -eristeellä eristettyjen rakenteiden homeindeksit tarkastelupisteittäni nykyilmastossa Jokioisen 2004 -testivuodella sekä tulevaisuuden ilmastossa Jokioisen 2050 -testivuodella.

Rakenne	testivuosi	TP1	TP2	TP3
MS 1959	Jokioinen 2004	0.00	0.00	0.31
MS 1959	Jokioinen 2050	0.02	0.02	0.30
MS 1963	Jokioinen 2004	0.00	0.00	0.30
MS 1963	Jokioinen 2050	0.02	0.02	0.30
MS 1990	Jokioinen 2004	0.00	0.00	0.00
MS 1990	Jokioinen 2050	0.01	0.01	0.02

Taulukosta 6.7 nähdään, että tulevaisuuden ilmastossa homeindeksin arvot nousevat MS 1959 ja MS 1963 -rakenteilla hieman nykyilmastoon nähden. Muutos on suurin tarkastelupisteessä TP1, missä viistosade vaikuttaa eniten. Ilmastomuutoksen vaikutukset ovat pieniä seinän alaosassa (TP3), missä maakosteuden vaikutuksesta suhteellinen kosteus on alun perinkin korkeampi. Tutkituissa tapauksissa homeindeksit jäävät kaikissa tarkastelupisteissä alle yhden, eli homeen kasvua ei tämän perusteella tapahdu myöskään tulevaisuuden ilmastossa.

MS 1990 -rakenteella ero tulevaisuuden- ja nykyilmaston homeindeksien välillä 50 mm CaSi 2 -tapauksessa on hyvin pieni, eli ilmastomuutoksella ei ole suurta vaikutusta rakenteen toimintaan. Ulkopuolisen eristyksen ansiosta vaikutukset voidaan olettaa yhtä lailla pieniksi myös muilla korjausratkaisuilla. 50 mm:n EPS-eristeellä ja 100 mm:n kevytbetonieristeellä suurimmat homeindeksin arvot saatiin tarkastelupisteessä TP3 (0,60 ja 0,19). Varaa on siis reilusti, joten näillä tiedoin korjausten voidaan olettaa toimivan myös tulevaisuuden ilmastossa.

6.5 Virhearviointi

Simulaatiossa jouduttiin tekemään monia yksinkertaistuksia, jotka aiheuttivat virhettä laskentatuloksiin. Yksinkertaistukset pyrittiin malleissa toteuttamaan niin, että ne tuovat

lisävarmuutta lopullisiin tuloksiin. Myös itse simulaatio-ohjelma sisältää erilaisia yksinkertaistuksia, jotka voivat vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Delphin ei esimerkiksi huomioi pintoja pitkin valuvaa vettä, mikä aiheuttaa virhettä osassa rakenteista. Saadut tulokset koskevat tutkittuja yksittäistapauksia, eivätkä välttämättä päde muille maanvastaisille seinärakenteille tai toisenlaisissa olosuhteissa oleville rakenteille. Korjaustapojen käyttökelpoisuus on aina arvioitava kohdekohtaisesti.

Laskentatarkasteluihin valittujen materiaalien ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi laskentatuloksiin. Todelliset materiaaliominaisuudet voivat poiketa huomattavasti valituista materiaalikirjaston ominaisuuksista, jolloin korjausratkaisujen käyttökelpoisuus tulee arvioida uudestaan. Anturan kautta betoniseinään kapillaarisesti nouseva maakosteus aiheutti suurimassa osassa tapauksista ongelmia korjausratkaisujen kosteustekniselle toiminnalle ilman, että rakenne on suorassa vesikontaktissa. Betonin kapillaarisuuskerroin voi kuitenkin vaihdella huomattavasti eri betonilaatujen välillä, eikä tiimmän betonin tapauksessa maakosteuden vaikutus ole välttämättä yhtä merkittävä.

Kaikki simulaatiot laskettiin Jokioisen 2004 rakennusfysikaalisen testivuoden säätiedoilla. Jokioisen säädata soveltuu tarkasteluihin, joissa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa pääosin ulkoilman suhteellinen kosteus. On mahdollista, että Vantaan 2007 testivuoden sääolosuhteet aiheuttavat kriittisemmät olosuhteet osalla rakenteista, viistosateen rasittaessa seinän ulkopintaa. Käytännössä betonin ulkopinta on yleensä pinnoitettu viistosateen imeytymistä vähentävällä pinnoitteella. Simulaatioista seinän maanpinnan yläpuolisen osan pinnoitteet on jätetty pois, joten kosteusrasitus on tutkituissa tapauksissa todellista voimakkaampaa. Jos oletetaan, että sokkelin ulkopinta on todellisuudessa pinnoitettu viistosateen imeytymistä estävällä pinnoitteella, Jokioisen sääolosuhteet muodostuvat kosteusteknisesti kriittisemmiksi. Tämä oletus tietenkin asettaa omat rajoituksensa tulosten hyödyntämiselle.

7. YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli laskennallisilla menetelmin arvioida maanvastaisten seinien sisäpuolisen lisälämmöneristämisen mahdollisuutta ja vertailla eri eristysmateriaalien toimintaa Suomen ilmasto-olosuhteissa. Tutkittaviksi rakenteiksi valittiin kolme tyyppilistä betonista maanvastaista seinärakennetta eri vuosikymmeniltä. Rakenteet nimettiin tyyppillisen rakentamisvuoden mukaan: MS 1959, MS 1963 ja MS 1990. Rakenteet eroavat toisistaan lähinnä lämmön- ja vedeneristeen sijainnin mukaan. MS 1959 -rakenteessa sekä lämmön- että vedeneristys on sijoitettu kantavan rakenteen sisäpuolelle. MS 1963:ssa vedeneristys on kantavan rakenteen ulkopuolella, mutta lämmöneristys sisäpuolella. MS 1990 taas edustaa käännettyä rakennetta, jossa sekä lämmön- että vedeneristys on sijoitettu rakenteen ulkopuolelle.

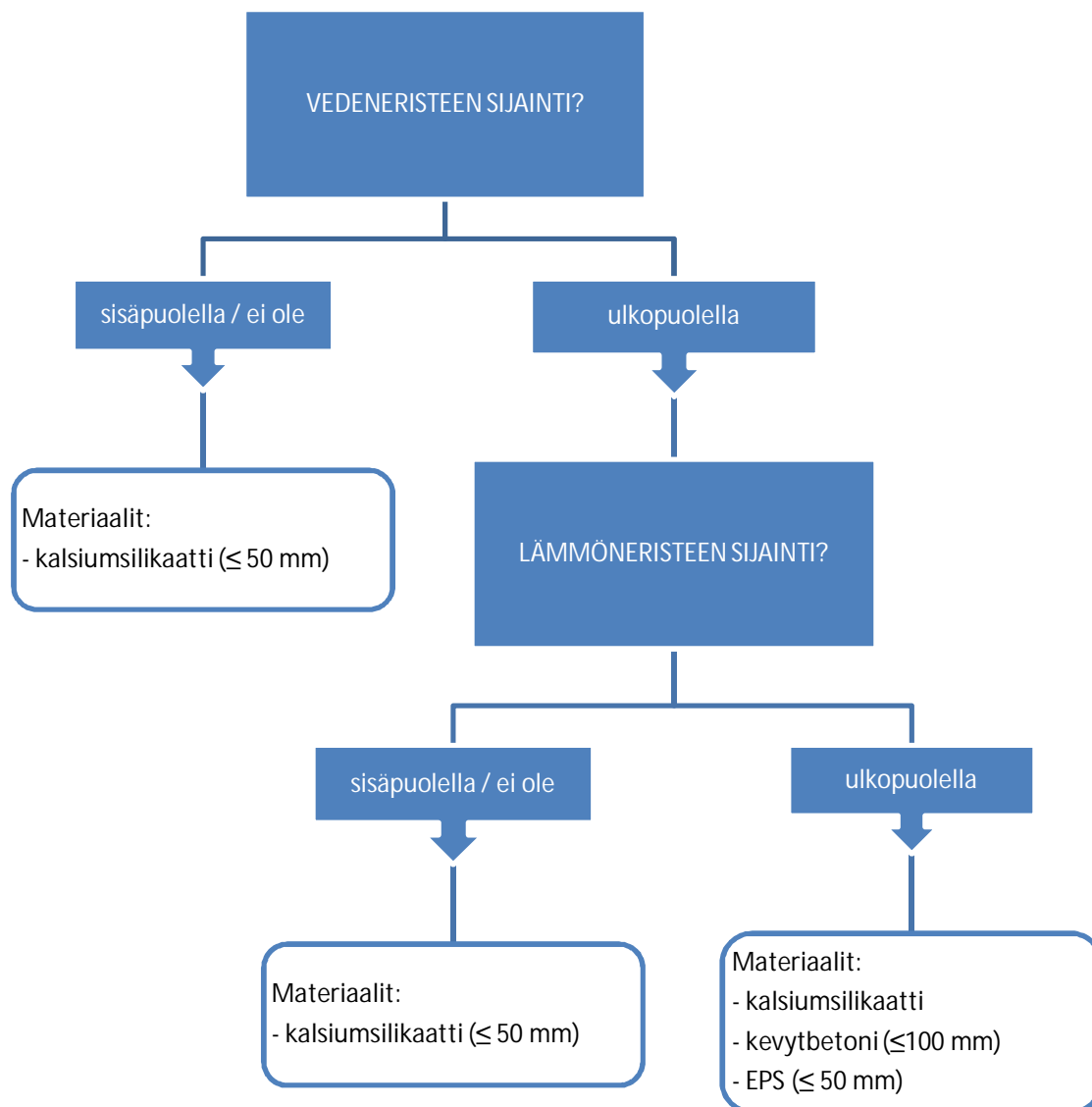
Vanhoissa maanvastaisissa seinissä on usein havaittu puutteita seinän ja anturan välisessä kapillaarikatkossa. Kyseisen kapillaarikatkon puuttuminen on huomioitu simulaatioissa, joten perustusten kautta kapillaarisesti nousevasta kosteudesta ei ole haittaa toimiviksi todetuille rakenteille. Simulaatioiden lähtöoletuksena kuitenkin oli, että pohjavedenpinta on pysyvästi perustamistason alapuolella. Pohjaveden pinnankorkeus on siis varmistettava ennen korjaustavan valintaa.

Perinteisten lämmöneristeiden, kuten mineraalivilla tai lastuvilla, sijoittamista maanvastaisen seinän sisäpuolelle on pidetty yleisesti virheellisenä ratkaisuna. Myös simulaatiot varmistivat tämän oletuksen. MS 1959 ja MS 1963 -tyyppisissä rakenteissa havaittiin suomalaisen homemallin mukaan toteutetulla tarkastelulla voimakasta homeenkasvua eristeen ulkopinnalla. Terve rakenne edellyttää siis aina vanhojen sisäpuolisten lämmön- ja vedeneristeiden purkamista.

Maanvastaisen seinän lämmöneristysten ensisijainen korjaustapa on aina ulkopuolinen eristys käännettynä rakenteena. Laskelmissa ulkopuolisena eristeenä käytettiin 100 mm paksua EPS-eristettä. EPS:n lisäksi ulkopuoliseksi eristeeksi soveltuvat myös tiiviimmät solumuovieristeet kuten XPS tai polyuretaani. Koska korjausratkaisu on toimiva 100 mm eristyspaksuudella, niin ratkaisu toimii myös paksummalla solumuovi eristeellä, sillä rakenne jää tällöin entistä lämpimämmäksi ja kosteusvirta maasta on entistä pienempi. Ulkopuolisen eristysten suositeltava toteuttamistapa edellyttää muutoksia rakennuksen julkisivuun, koska eristys on ulotettava myös seinän maanpinnan yläpuoliseen osaan.

Jos korjausta ei pystytä toteuttamaan ulkopuolelta, voidaan valita sopiva sisäpuolinen korjausratkaisu. Korjaukseen soveltuvat materiaalit riippuvat lämmöneristeen ja ve-

deneristeen sijainnista kantavaan rakenteeseen nähden. Kuvassa 7.1 on esitetty prosessaavio sopivan eristysmateriaalin valitsemiseksi.



Kuva 7.1 Sisäpuolisen eristysmateriaalin valintakaavio, jossa alkuperäisen rakenteen eristeiden sijaintia tarkastellaan kantavaan rakenteeseen nähden.

MS 1959 -tyyppisen seinän korjauksessa sisäpuoliset rakenteet puretaan paljaaseen betonipintaan asti. Korjatussa rakenteessa ei siis ole lainkaan vedeneristystä. Vedeneristeen puuttuminen rajoittaa hyvin paljon eristysmateriaalien valintaan ja tutkimuksen perusteella sisäpuoliseksi lämmöneristeeksi soveltuu vain hyvin vesihöyryä läpäisevä ja voimakkaasti kapillaarinen eriste, kuten kalsiumsilikaattilevy, jonka paksuus on korkeintaan 50 mm.

MS 1963 -tyyppisen seinän sisäpuoliset eristysrakenteet puretaan paljaaseen betonipintaan asti. Vanha vedeneriste sijaitsee seinän ulkopuolella, joten vedeneristys säilyy. Rakenteeseen pääsee kuitenkin kosteutta seinän ulkoilmaan rajoittuvan osan sääräsituksen

sekä perustusten kautta nousevan maakosteuden takia. Tiivis eristys sisäpuolella estäisi kosteuden haihtumisen seinän sisäpinnalta, joten solumuovieristeitä ei voida käyttää. Turvallisin materiaali sisäpuoliseen lämmöneristykseen tämän tyyppisessä rakenteessa on voimakkaasti kapillaarinen ja hyvin vesihöyryä läpäisevä rakennuslevy, kuten kalsiumsilikaattilevy. Myös MS 1963 -rakenteen tapauksessa eristyspaksuus on maksimissaan 50 mm. Viistosateen imeytymistä ja veden kapillaarista nousua rajoittamalla esimerkiksi kevytbetonin käyttö saattaisi myös olla mahdollista, mutta korjausratkaisun toimivuuden varmistaminen vaatii lisätutkimuksia.

MS 1990 -tyyppisessä seinässä lämmön- ja vedeneristeet ovat seinän ulkopuolella, joten purettavia eristekerroksia ei ole. Mahdolliset pinnoitteet on kuitenkin poistettava ja betonin pinta puhdistettava ennen lisäeristeen asennusta. Ulkopuolisen lämmöneristyksen ansiosta rakenne pysyy kuivana ja lämpimänä, joten eristykseen käytettäviä materiaali- vaihtoehtoja on enemmän. Voimakkaasti kapillaarinen ja hyvin vesihöyryä läpäisevä rakennuslevy, kuten kalsiumsilikaattilevy, on myös MS 1990 -rakenteen kohdalla turvallisin ratkaisu, eikä eristyspaksuutta tässä tapauksessa tarvitse rajoittaa. Sisäpuolinen lisäeristys voidaan toteuttaa myös 50 mm paksulla EPS-eristeellä tai korkeintaan 100 mm paksulla kevytbetonilla. Solumuovieristeet muodostavat tiiviin pinnan seinän sisäpuolelle, ja rakenteen kuivuminen sisäänpäin hidastuu. Kosteusvaurion riski on siis suurempi kuin diffuusioavoimilla materiaaleilla.

Tutkimuksen perusteella kalsiumsilikaatti on turvallinen vaihtoehto maanvastaisten betoniseinien sisäpuoliseen lisälämmöneristämiseen, kunhan huomioidaan rakennekohtaiset paksuusrajoitukset. Kalsiumsilikaattilevyjen laaduissa on myös havaittavissa huomattavia eroja, eikä kaikki saatavilla olevat materiaalit sovellu sisäpuoliseen eristämiseen. Materiaalia valitessa on varmistettava, että kalsiumsilikaatin kapillaarinen vedenimukyky sekä vesihöyrynläpäisevyys ovat riittävät. Kun kapillariteettikerroin $A_w > 1,11 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ ja diffuusionvastus $\mu < 3,85$, rakenteen kosteustekninen toimivuus on varmalla puolella. Lisäksi maanvastaiset rakenteet eivät saa olla suorassa kosketuksessa maassa olevaan pohjaveteen tai paineelliseen veteen.

Sisäpuolelta lämmöneristetyille seinille (MS 1959 ja MS 1963) ainoaksi toimivaksi ratkaisuksi osoittautunut 50 mm paksu kalsiumsilikaattieriste on lämmöneristävyydeltään alkuperäisiä purettavia eristysrakenteita heikompi, joten korjatun rakenteen U-arvo nousee alkuperäistä korkeammaksi. Rakenteen lämmöneristävyysparantaminen sisäpuolelta kosteusteknisesti toimivalla tavalla ei siis tämän tyyppisissä tapauksissa ole mahdollista.

Jos maanvastaisissa rakenteissa on viitteitä kosteusvaurioista, on ensisijaisesti puututtava vaurioiden aiheuttajiin. Virheellisestä vedenohjauksesta tai pohjaveden korkeudesta johtuvat kosteusrasitukset on poistettava ennen lämmöneristyksen lisäämistä. Tapauksessa, jossa rakennuksen vierustäytöt joudutaan joka tapauksessa kaivamaan auki, on uusi lämmöneriste järkevintä lisätä suositusten mukaisesti seinän ulkopuolelle. Maan-

vastaisissa seinissä, joissa vapaan veden kulkeutuminen rakenteeseen on estetty, voidaan lisälämmöneristys toteuttaa myös kantavan rakenteen sisäpuolelle. Sisäpuolelta eristettäessä, rakenteeseen ei asenneta höyrynsulkua. Eristysmateriaaliksi on sekä kirjallisuuden että nyt tehtyjen tutkimusten perusteella ensisijaisesti valittava mahdollisimman hyvin vesihöyryä läpäisevä materiaali, joka mahdollistaa kosteuden kuivumisen sisäänpäin. Sisäpuoliseksi pinnoitteeksi sopivat vain diffuusioavoimet materiaalit. Viistosateen imeytymisen estämiseksi sokkeli on syytä suojata tarkoitukseen soveltuvalla pinnoitteella.

Useiden korjausratkaisujen kohdalla maasta vesihöyrynä rakenteeseen siirtyvä kosteus nostaa RH:n seinän alaosassa korkeaksi, jolloin myös homeindeksi nousee yli sallitun rajan. Tapauksissa, joissa korkeita homeindeksejä havaittiin vain seinän alaosassa (TP3) olisi hyvä tarkastella myös niin, että kosteuden siirtyminen anturasta seinään on katkaistu. Lisätutkimuksilla voitaisiin varmistaa epävarmaksi jääneiden korjausratkaisujen kosteustekninen toimivuus.

Esitetyt korjausratkaisut ovat laskennallisten tarkasteluiden perusteella toimivia Suomen ilmasto-olosuhteissa. Jatkotutkimuksena olisi hyvä tarkastella sisäpuolisten lisälämmöneritysratkaisujen vaurioherkkyyttä simuloimalla erilaisia vuototapauksia Delphin-ohjelmalla. Tarkasteluja voisi laajentaa koskemaan myös tiili- ja harkkorakenteisia maanvastaisia seiniä sekä tapauksia, joissa rakenne on kosketuksissa pohjaveden pintaan. Tutkimustuloksia olisi hyvä täydentää myös kenttätutkimuksilla.

LÄHTEET

- Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus - Rakennusfysiikka. Helsinki, Rakennustieto
- Oy.Goldberg, L. F. & Steigauf, B. (2013). Cold Climate Foundation Retrofit Energy Savings: The Simulated Energy and Experimental Hygrothermal Performance of Cold Climate Foundation Wall Insulation Retrofit Measures—Phase I, Energy Simulation. U.S. Department of Energy. building and Technologies Program. USA.
- Hagentoft, C-E. (2001). Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund.
- Häupl, P., Fechner, H., & Petzold, H. (2004). Interior retrofit of masonry wall to reduce energy and eliminate moisture damage: comparison of modeling and field performance. Proceedings of the thermal performance of the exterior envelopes of buildings IX, Clearwater Beach, FL, 5–10 Joulukuu 2004.
- Kehrer, M., Pallin, S., Harmon, A. & Goldberg, L. F. (2012). Hygrothermal Simulation of Foundations: Part 1, Soil Material Properties. Oak Ridge National Laboratory. USA.
- Klõšeiko, P., Arumägi, E. & Kalamees, T. (2015). Hygrothermal performance of internally insulated brick wall in cold climate: A case study in a historical school building. Journal of Building Physics. Maaliskuu 2015 vol. 38 no. 5 444-464
- Krus, M. (1996). Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral building Materials—Theoretical Principles and New Test Methods. Fraunhofer Institute of Building Physics. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.
- Kuljunen, M. (2014). Ruiskutettavan polyuretaanin lämpö- ja kosteustekninen toimivuus korjausrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- Künzel, H. M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Leivo, V. & Rantala, J. (2002). Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tutkimusjulkaisu 120. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. 106 s. + 13 liites.
- Mills, A. F. (1999). Basic Heat & Mass Transfer, Second Edition. University of California at Los Angeles. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Neuvonen, P. (2006). Kerrostalot 1880–2000, Arkkitehtuuri rakennustekniikka korjaaminen. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustekniikan keskus -säätiö ja Museovirasto. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Palviainen, T. (2010). Maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Helsinki.

Pirinen, J. (1999). Hyvän rakentamistavan mukainen pientalojen kosteuden hallinta eri vuosikymmeninä. Lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere.

Ramsay, P. (2013). Kellarin seinän korjausvaihtoehdot. Insinööritö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Espoo.

RIL 107-2012. (2012). Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 255-1-2014. (2014). Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 250-2011. (2011). Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

Ronkainen, N. (2012). Suomen ympäristö 2. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus.

Sisäilmayhdistys. (2008). Kellarin seinät. Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveellisetilat, Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveellisetilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Kellarin-seinat>

SPU. Eristä oikein: Kellari. SPU Eristeet. Saatavissa http://spu.studio.crasman.fi/pub/Website+material/PDF+and+other+files/Own+instructions%2C+manuals%2C+brochures%2C+material/Erista_oikein-Kellari.pdf

Suomen Betoniyhdistys. (2012). BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2004. BY-koulutus Oy / Suomen Rakennusmedia Oy. 570 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Kärkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere.

Vinha, J. (2011). RTEK-3511 Rakennusfysiikka, Luentomoniste 2011, osat 1 ja 2. Rakennustekniikanlaistos.

Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iitti, H. (2011). Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti. VTT & TTY.

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palo-

lahti, T. (2013) Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennuksen energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. Tampere.

YM. (2002). C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys Ohjeet 2003. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki.

YM. (2012). C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys Ohjeet 2012. LUONNOS 16.maaliskuuta 2012. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki.

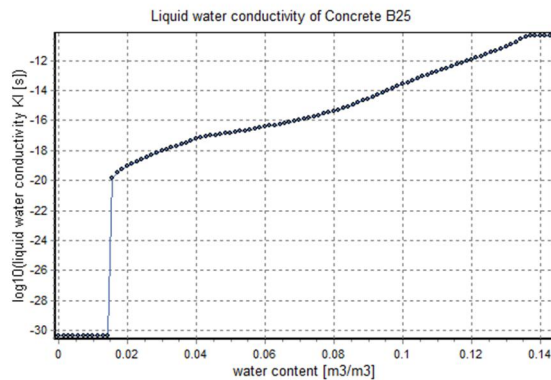
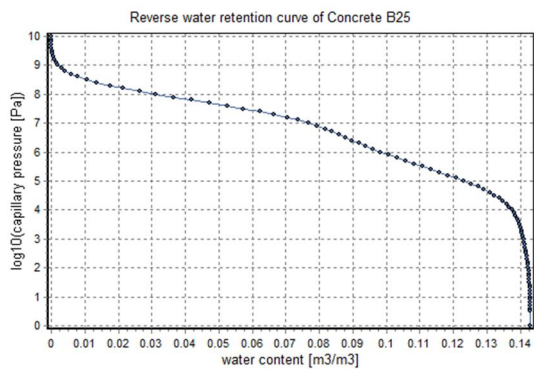
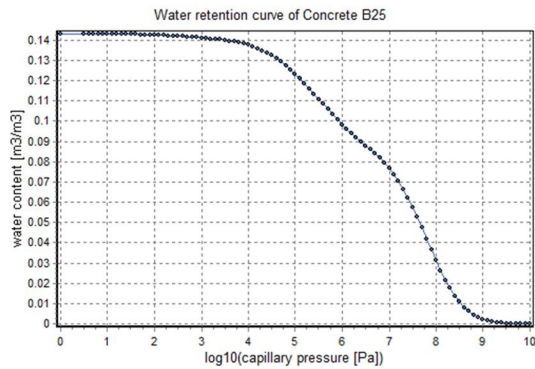
YM. (2013). Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. 27.2.1013. Helsinki.

YM. (2014). Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Rakenteiden kosteustekninen käyttäytyminen. Ympäristöministeriö. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot_ja_lausuntoyhteenvedot/2015/Lausuntopyynto_luonnoksesta_rakennusten_%2832552%29

LIITE A: SIMULAATIOISSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAI-SUUDET

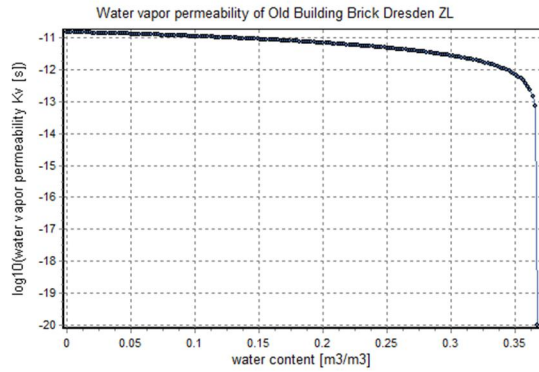
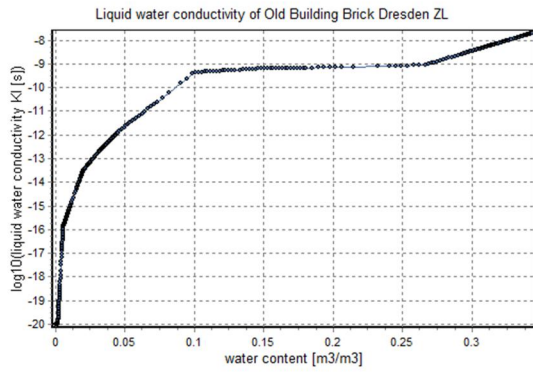
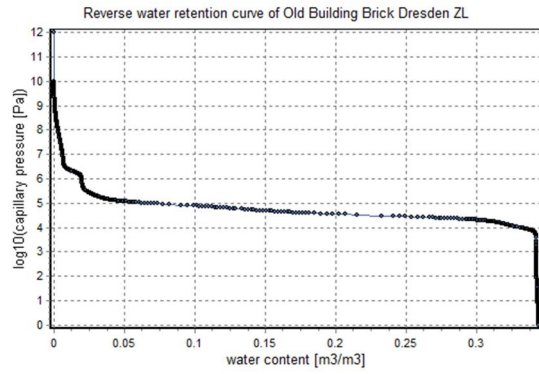
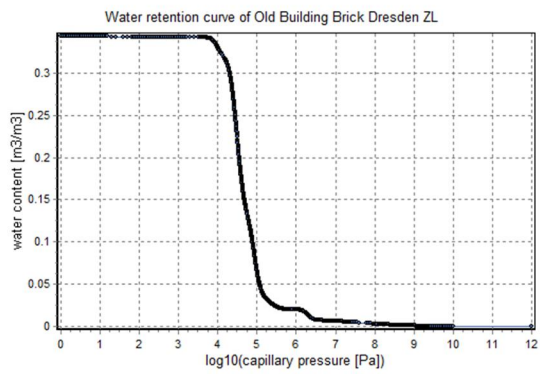
Betoni (Concrete B25)

r	=	2320.2	kg/m ³
c_e	=	850	J/kgK
q_{por}	=	0.143	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.14299	m ³ /m ³
q_{cap}	=	0.136	m ³ /m ³
q_{80}	=	0.058206	m ³ /m ³
l	=	2.1	W/mK
A_w	=	0.008333	kg/m ² s ^{0.5}
m	=	110	-
$K_{l,eff}$	=	4.40E-11	s



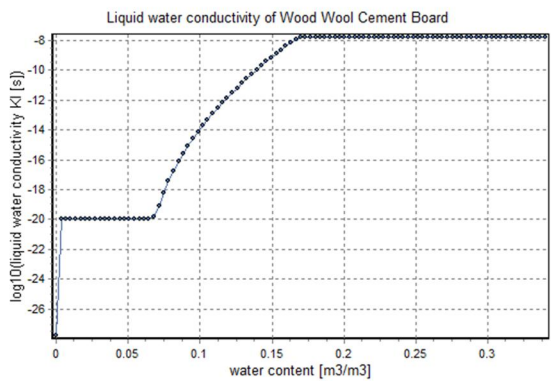
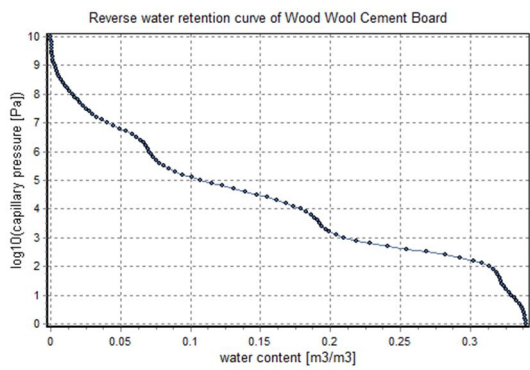
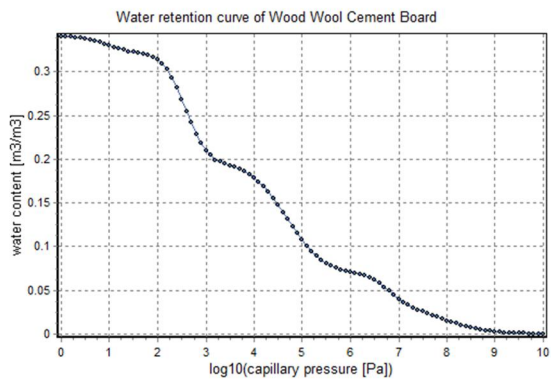
Tiili (Old Building Brick Dresden ZL)

r	=	1676.5	kg/m ³
c_e	=	933.847	J/kgK
q_{por}	=	0.367357	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.34383	m ³ /m ³
q_{cap}	=	0.266	m ³ /m ³
q_{80}	=	0.00474	m ³ /m ³
l	=	0.5215	W/mK
A_w	=	0.356793	kg/m ² s05
m	=	13.2483	-
$K_{l,eff}$	=	1.96E-08	s



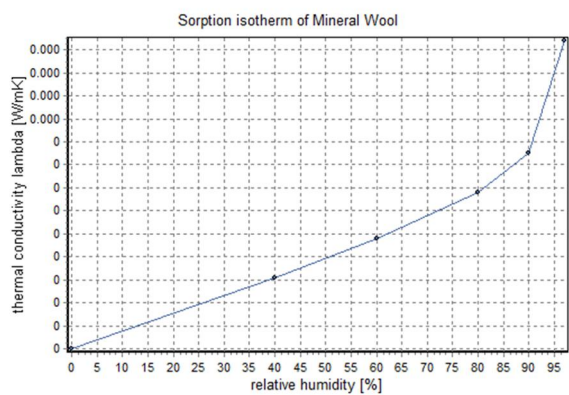
Lastuvilla (Wood Wool Cement Board)

r	=	180	kg/m3
c_e	=	1470	J/kgK
q_{por}	=	0.9308	m3/m3
q_{eff}	=	0.34	m3/m3
q_{cap}	=	0.34	m3/m3
q_{80}	=	0.0258	m3/m3
l	=	0.06	W/mK
A_w	=	0.0089	kg/m2s05
m	=	4.9	-
$K_{l,eff}$	=	1.68E-08	s



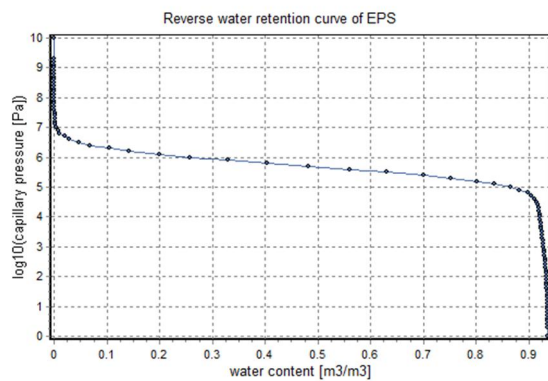
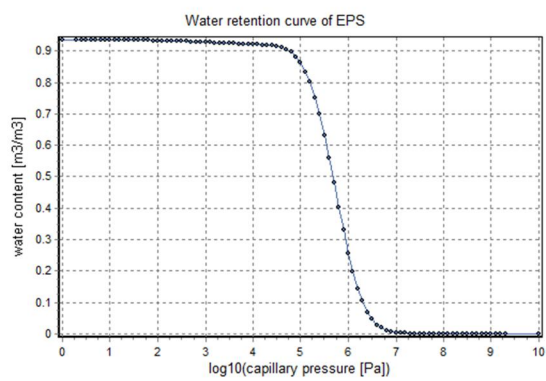
Mineraalivilla (Mineral Wool)

r	=	37	kg/m ³
c_e	=	840	J/kgK
q_{por}	=	0.92	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.9	m ³ /m ³
q_{cap}	=	0.9	m ³ /m ³
q_{80}	=	0.00016	m ³ /m ³
l	=	0.04	W/mK
A_w	=	0	kg/m ² s ^{0.5}
m	=	1	-
$K_{l,eff}$	=	0.00	s
K_G	=	0.0001	s



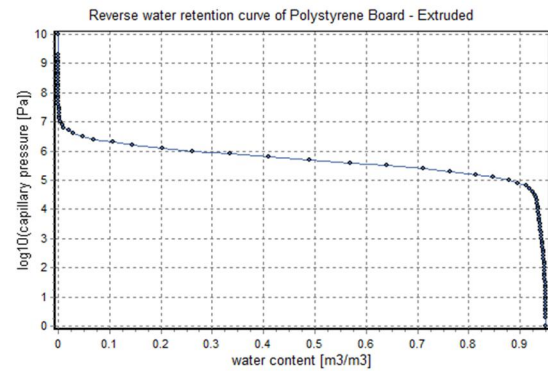
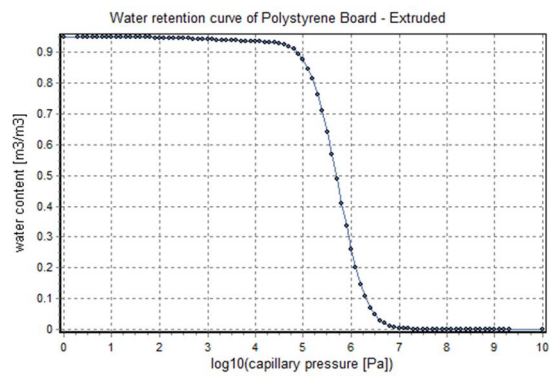
EPS

r	=	35	kg/m ³
c_e	=	1500	J/kgK
q_{por}	=	0.935	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.935	m ³ /m ³
q_{cap}	=	0.0007	m ³ /m ³
q_{80}	=	0.0006	m ³ /m ³
l	=	0.039	W/mK
A_w	=	1E-05	kg/m ² s05
m	=	50	-
$K_{l,eff}$	=	0	s



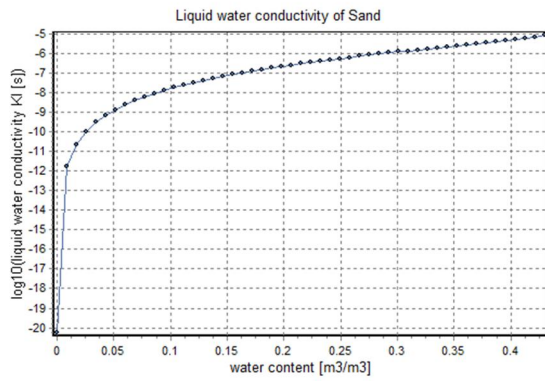
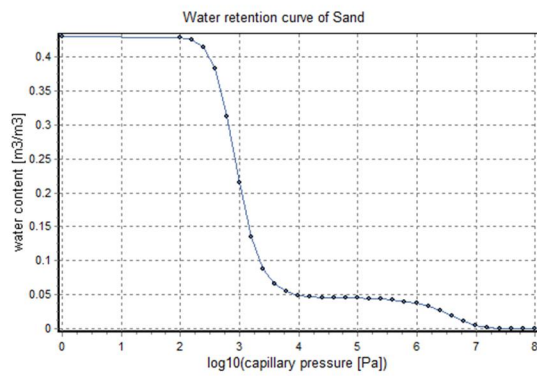
XPS (Polystyrene Board - Extruded)

r	=	40	kg/m ³
c_e	=	1500	J/kgK
q_{por}	=	0.951	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.95	m ³ /m ³
q_{80}	=	1E-05	m ³ /m ³
l	=	0.03	W/mK
A_w	=	8E-06	kg/m ² s05
m	=	150	-
$K_{l,eff}$	=	0	s



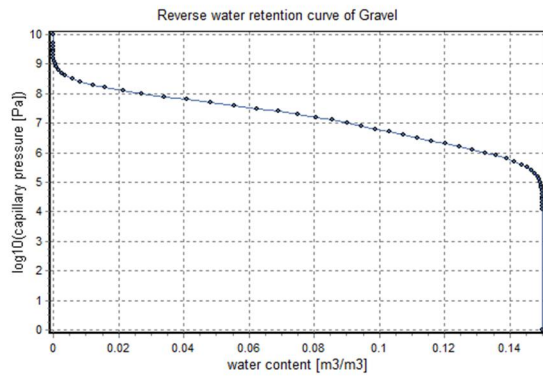
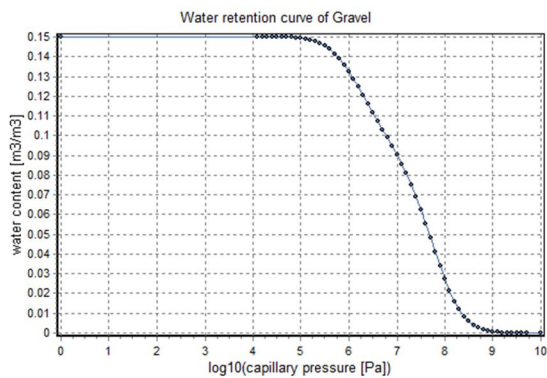
Hiekka (Sand)

r	=	1513	kg/m ³
c_e	=	805	J/kgK
q_{por}	=	0.43	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.43	m ³ /m ³
q_{80}	=	1E-04	m ³ /m ³
l	=	1.22	W/mK
A_w	=	2E+00	kg/m ² s ^{0.5}
m	=	15	-



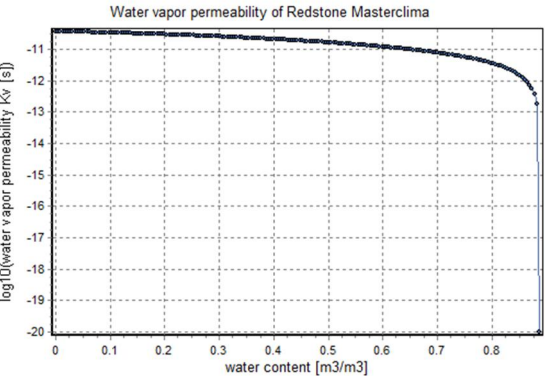
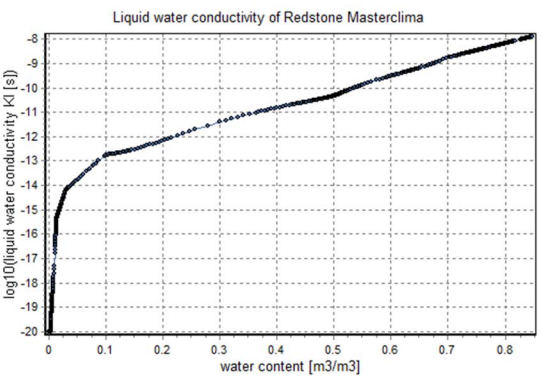
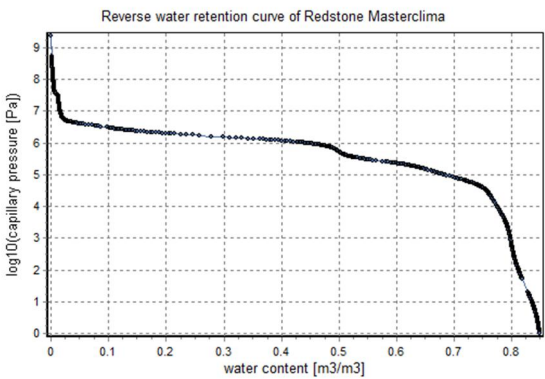
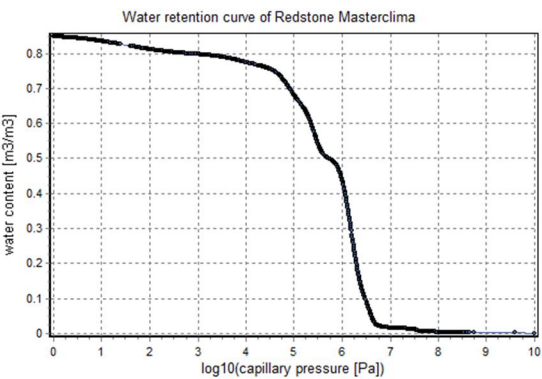
Sora (Gravel)

r	=	2650	kg/m ³
c_e	=	1050	J/kgK
q_{por}	=	0.24	m ³ /m ³
q_{eff}	=	0.15	m ³ /m ³
q_{cap}	=	1.50E-01	m ³ /m ³
q_{80}	=	0.0637327	m ³ /m ⁴
l	=	2.10E+00	W/mK
A_w	=	3.00E-11	kg/m ² s ^{0.5}
m	=	7	-
$K_{l,eff}$	=	7.01E-09	s



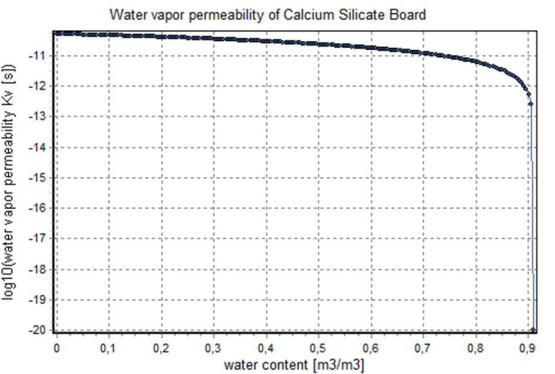
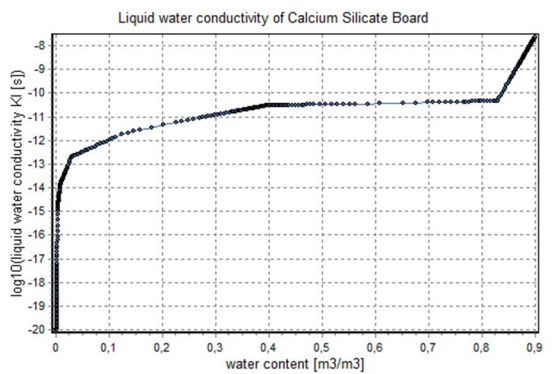
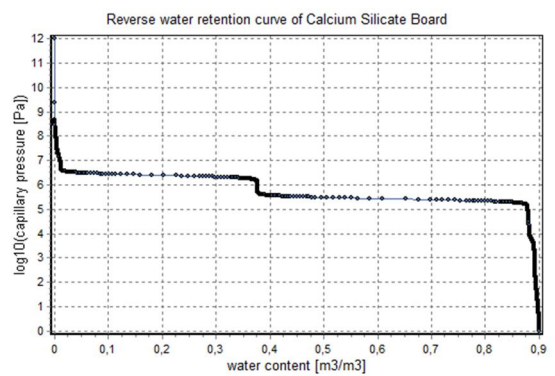
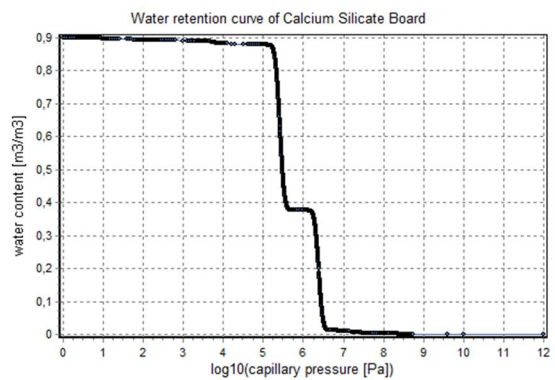
CaSi1 (Red Stone Masterclima)

r	=	277.393	kg/m3
c_e	=	1063.53	J/kgK
q_{por}	=	0.88705	m3/m3
q_{eff}	=	0.848	m3/m3
q_{cap}	=	0.7065	m3/m3
q_{80}	=	0.0125579	m3/m4
l	=	0.0805	W/mK
A_w	=	0.664266	kg/m2s0,5
m	=	5.37638	-
$K_{l,eff}$	=	1.25513E-08	s



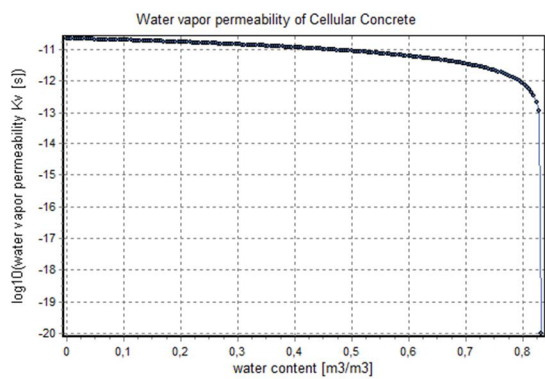
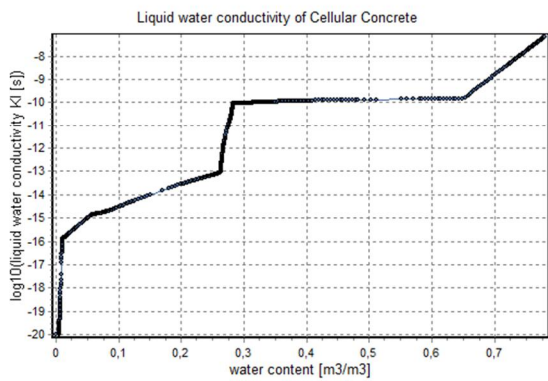
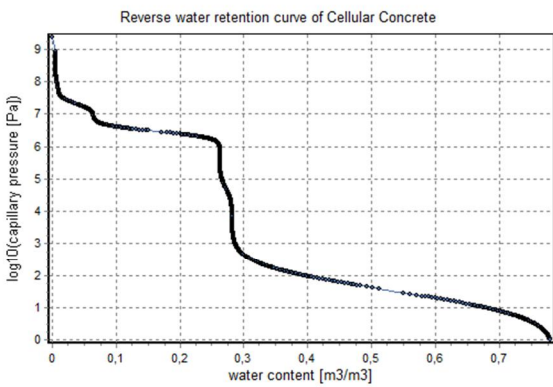
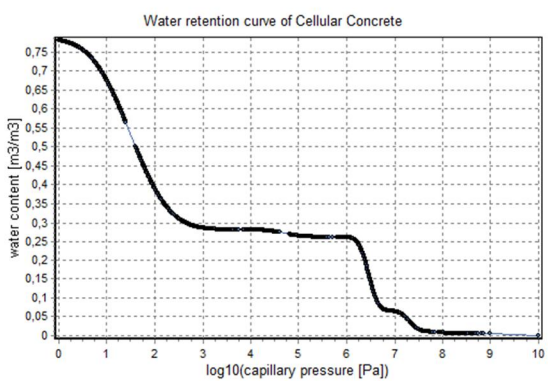
CaSi2 (Calsium Silicate Board)

r	=	270.137	kg/m3
c_e	=	1157.88	J/kgK
q_{por}	=	0.91	m3/m3
q_{eff}	=	0.900184	m3/m3
q_{cap}	=	0.8300	m3/m3
q_{80}	=	0.00477274	m3/m4
l	=	0.06895	W/mK
A_w	=	1.114580	kg/m2s0,5
m	=	3.84795	-
$K_{l,eff}$	=	2.33449E-08	s



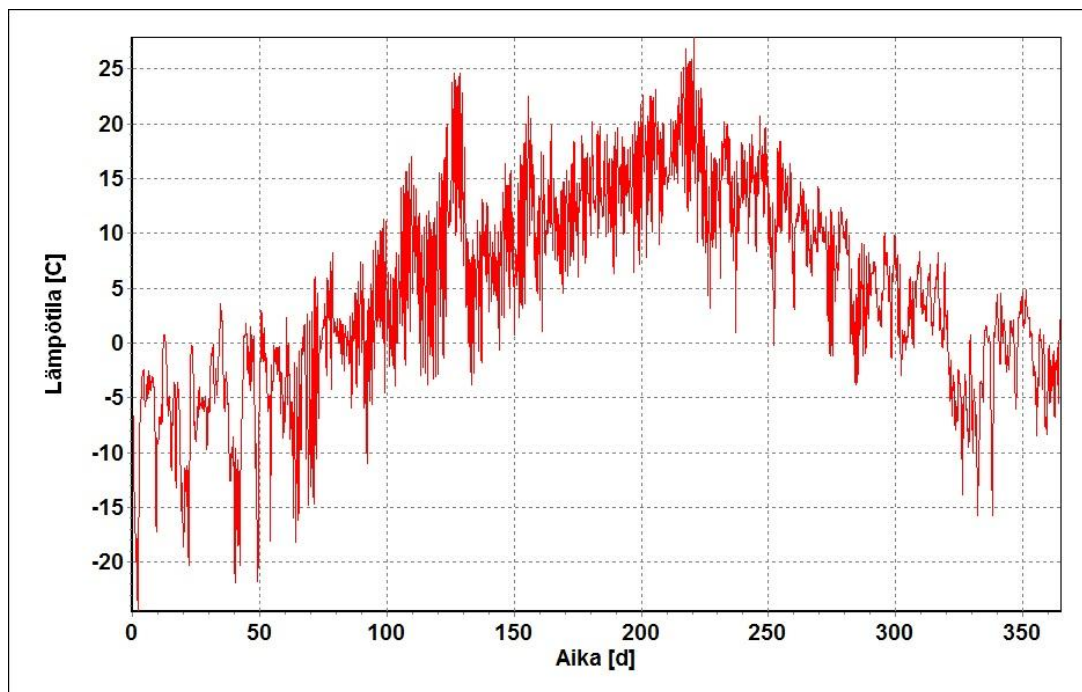
Kevytbetoni (Cellular Concrete)

r	=	414.648	kg/m3
c_e	=	850	J/kgK
q_{por}	=	0.831718	m3/m3
q_{eff}	=	0.78	m3/m3
q_{cap}	=	0.65	m3/m3
q_{80}	=	0.0180333	m3/m4
l	=	0.1	W/mK
A_w	=	0.0390645	kg/m2s05
m	=	8.87439	-
$K_{l,eff}$	=	6.71125E-08	s

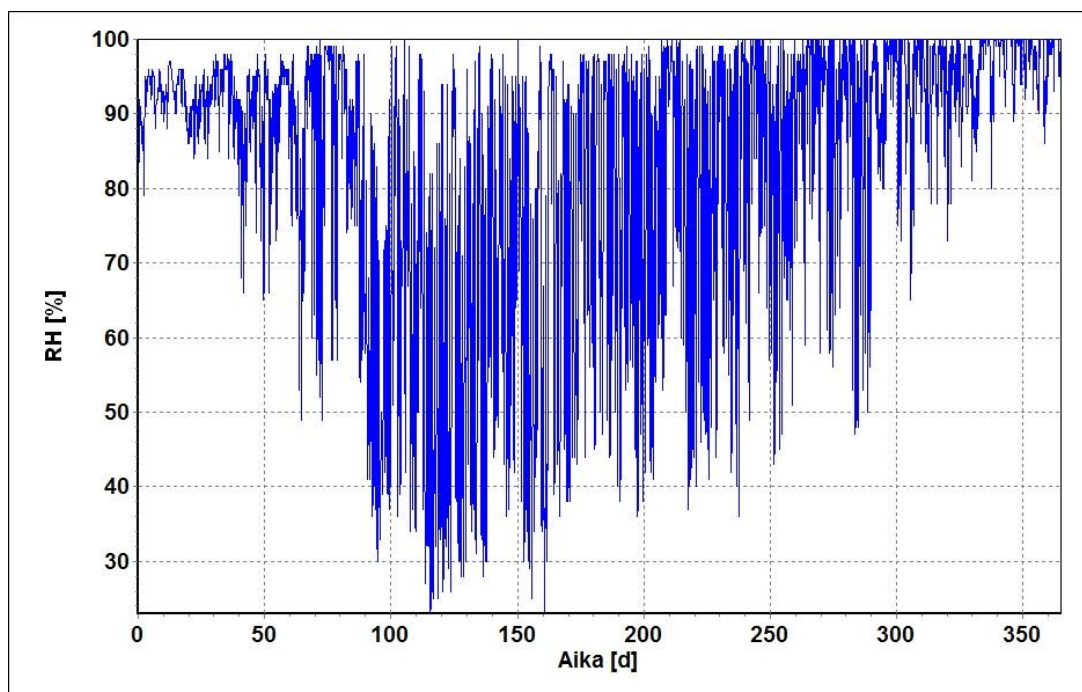


LIITE B: KÄYTETTYJEN ILMASTO-OLOSUHTEIDEN KUVAAJAT

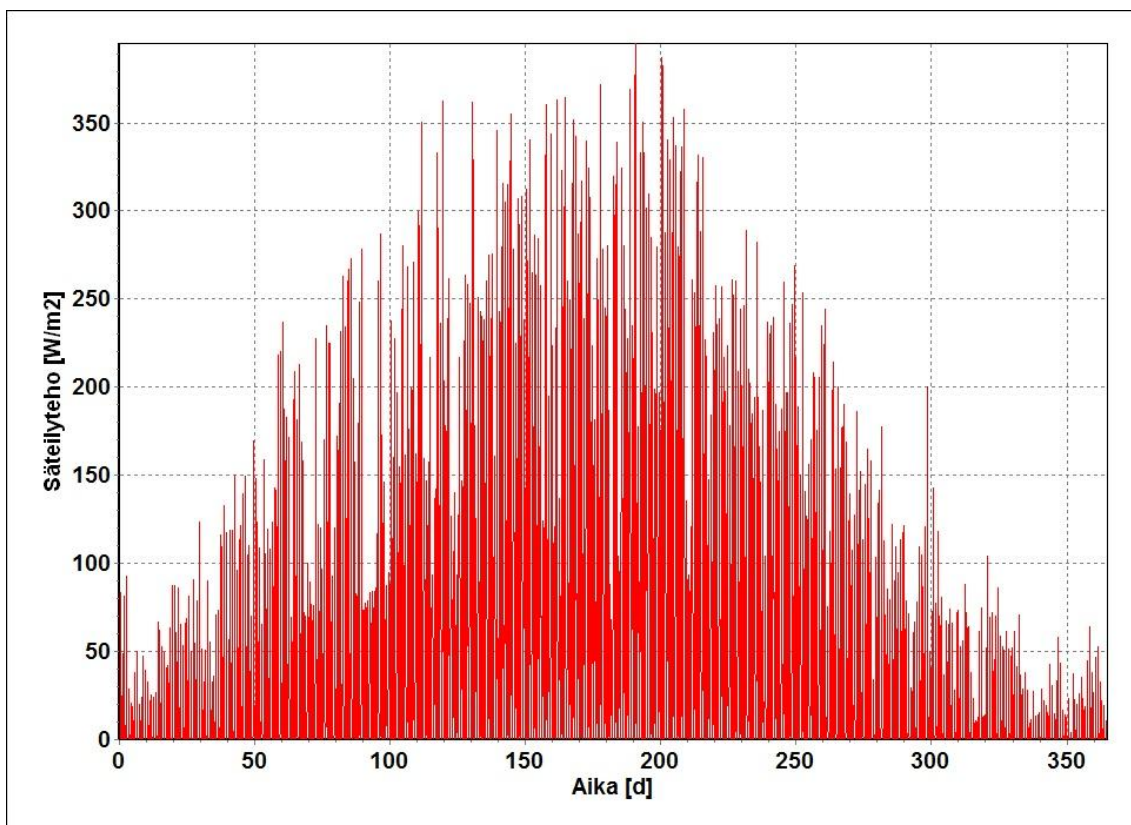
Jokionen 2004:



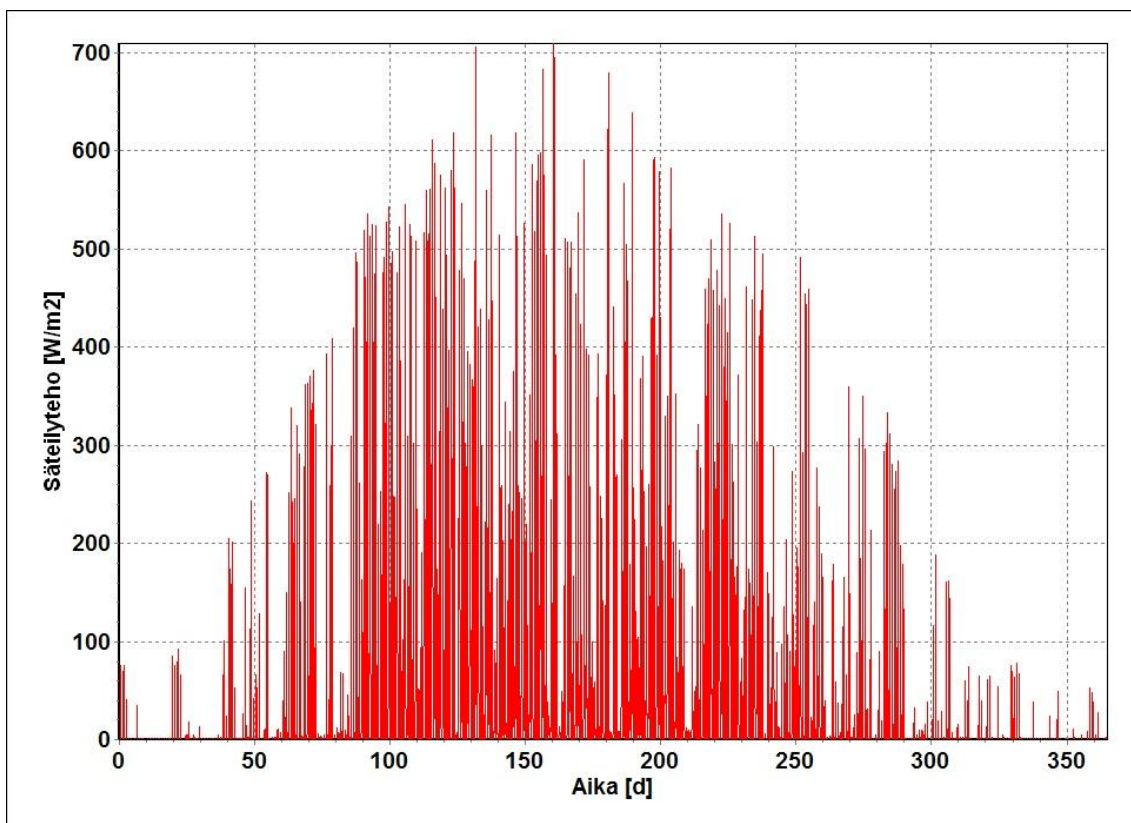
Kuva B.1 Jokioisen 2004 testivuoden lämpötilakuvaaja



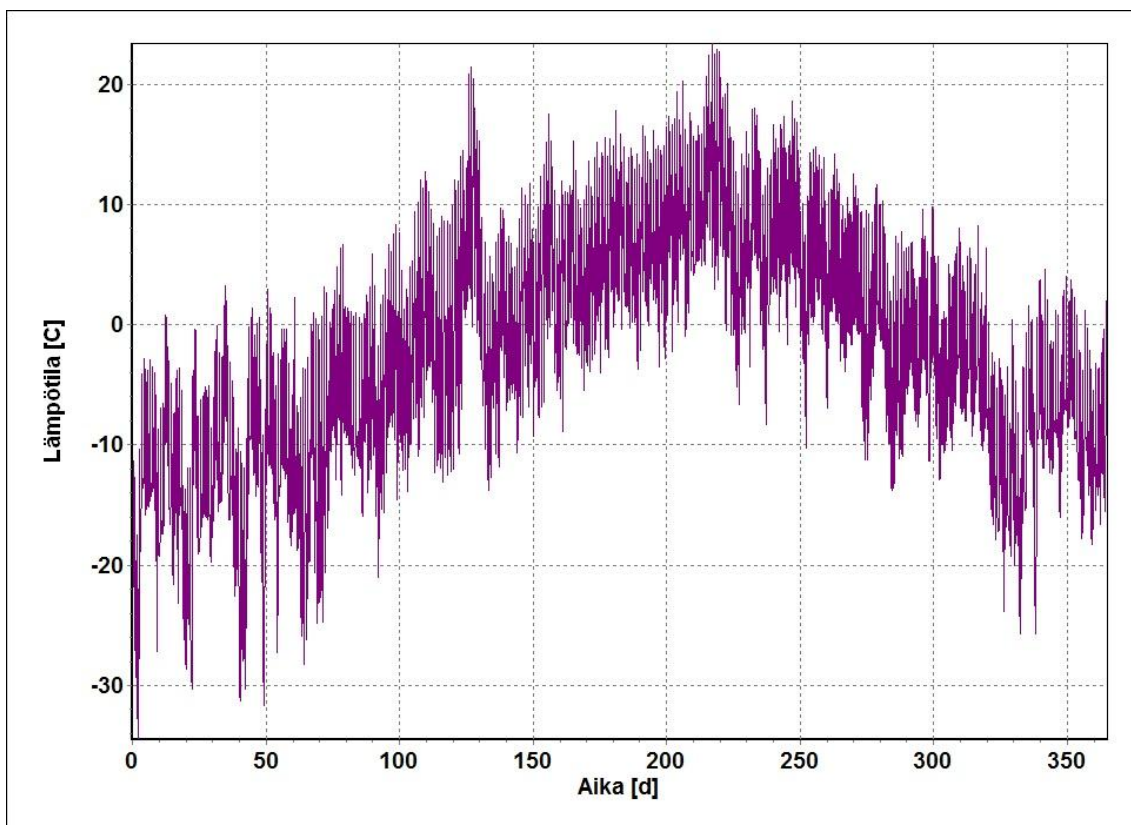
Kuva B.2 Jokioisen 2004 testivuoden ulkoilman suhteellisen kosteuden kuvaaja



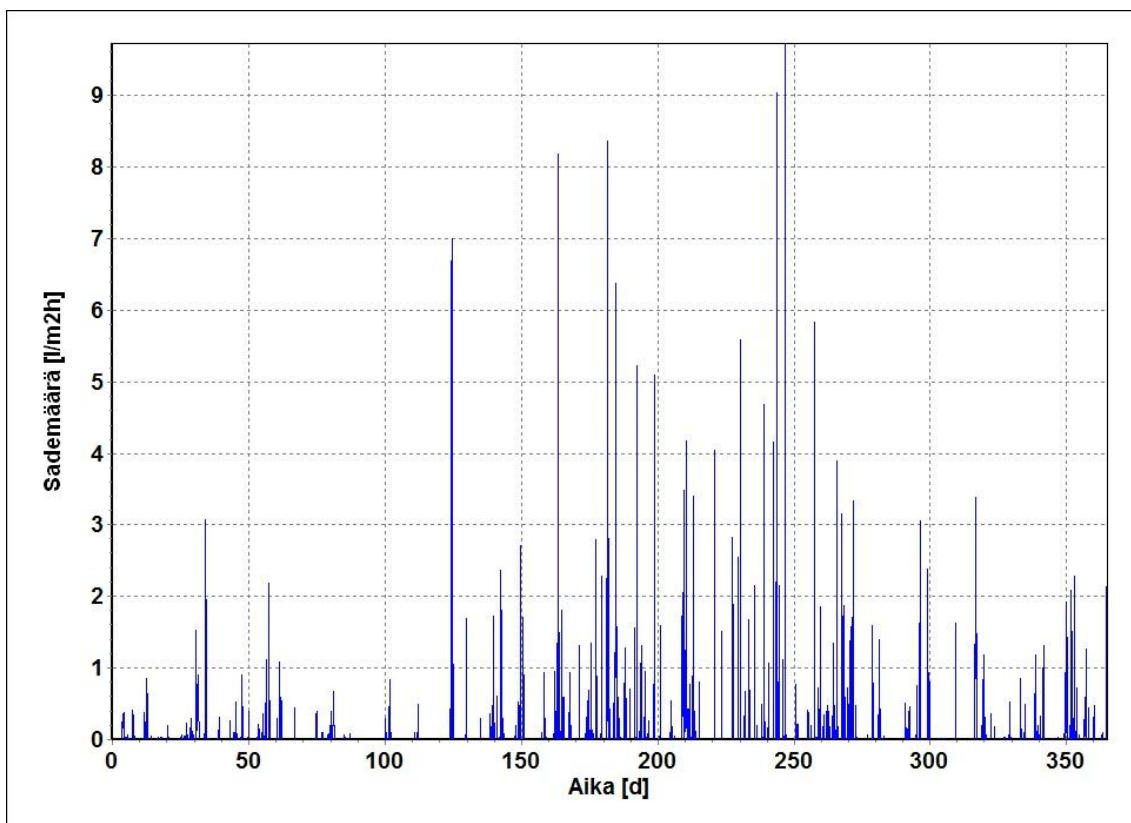
Kuva B.3 Jokioisen 2004 testivuoden diffuusin lyhytaaltoisen säteilyn määrä



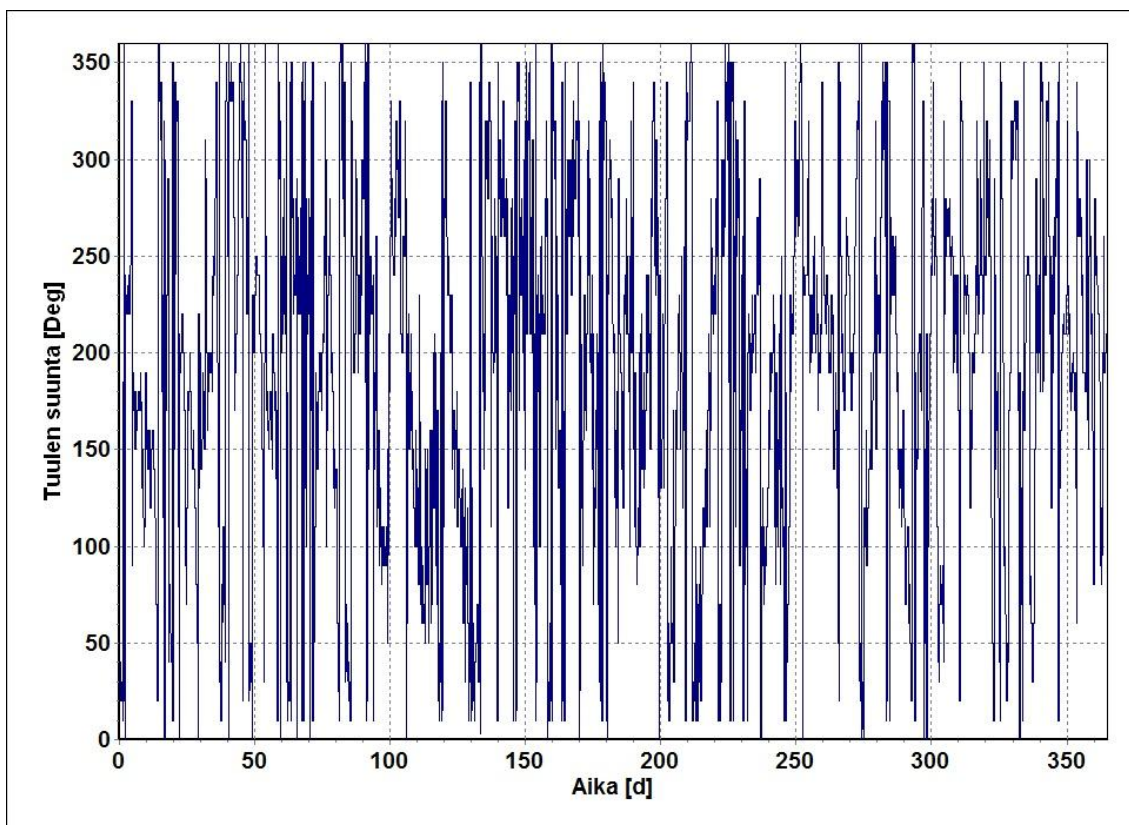
Kuva B.4 Jokioisen 2004 testivuoden suoran lyhytaaltoisen säteilyn määrä



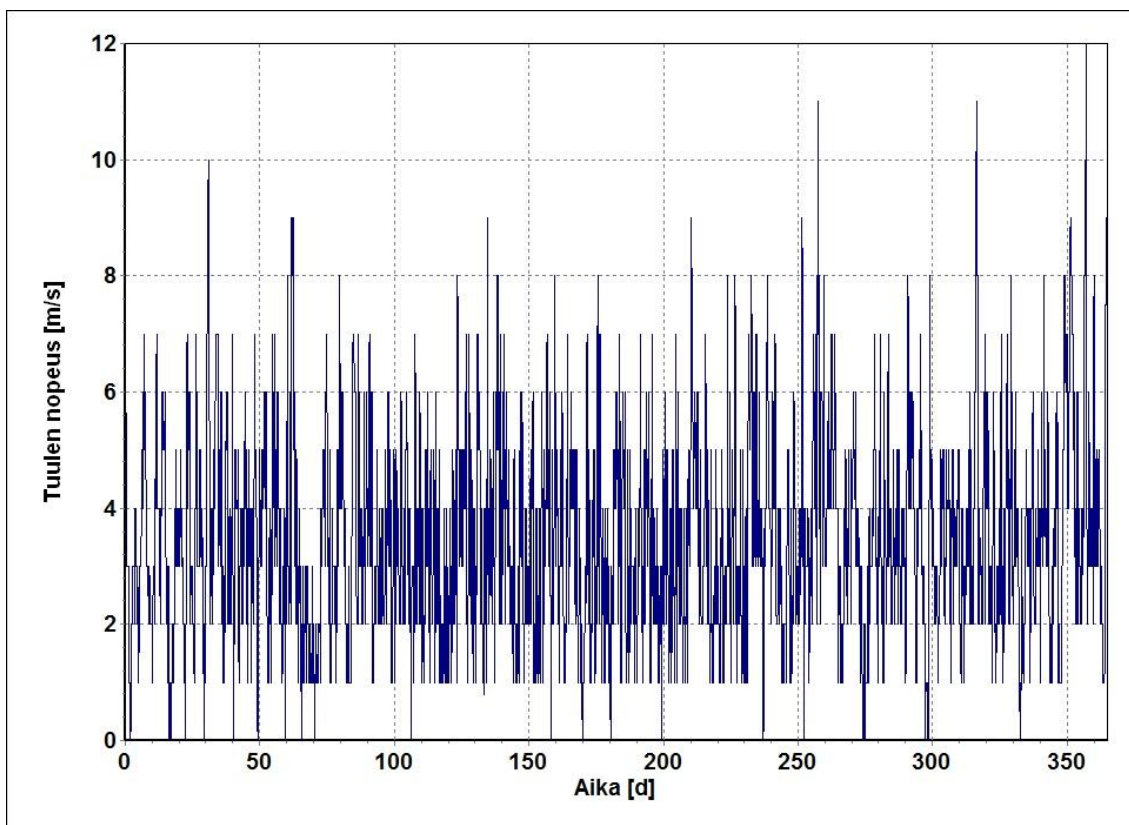
Kuva B.5 Jokioisen 2004 testivuoden taivaan lämpötila



Kuva B.6 Jokioisen 2004 testivuoden sademäärä vaakapinnalle



Kuva B.7 Jokioisen 2004 testivuoden tuulen suunta (0° =pohjoinen, 90° =itä, 180° =etelä ja 270° =länsi)



Kuva B.8 Jokioisen 2004 testivuoden tuulen nopeus

LIITE C: LÄMMÖNJOHTAVUUDET U-ARVOJEN LASKENNASSA

Taulukko C.1 *U-arvojen laskennassa käytetyt lämmönjohtavuudet (YM 2003 & YM 2012)*

Materiaali	λ
Betoni	1.7
Tiili	0.5
Kevytbetoni	0.17
Kalsiumsilikaatti	0.07
Hiekka	2.0
Lastuvilla	0.08
XPS	0.041
EPS, sisätilassa	0.045
EPS, maata vasten	0.06
Mineraalivilla	0.06